

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Zrinka Burić

Zagreb, 2011.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Joško Parunov, dipl. ing.

Studentica:

Zrinka Burić

Zagreb, 2011.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zrinka Burić

ZAHVALA

Posebno se zahvaljujem svom mentoru prof. dr. sc. Jošku Parunovu na vođenju i pomoći tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Također se zahvaljujem dipl. ing. Marku Tomiću i dipl. ing. Maru Ćorku na stručnim savjetima, strpljenju i uloženom vremenu te kolegama na pomoći i što su učinili ovo vrijeme studiranja zabavnijim.

Veliko hvala mojim roditeljima i sestrama što su sa strpljenjem i podrškom bili uz mene tijekom studiranja.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne
simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

Mat. br.:

Naslov:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Mladen Andrassy

Referada za diplomske i završne ispite

Obrazac DS – 3A/PDS - 3A

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK	VI
1. UVOD	1
2. SUDAR I NASUKAVANJE TANKERA.....	4
2.1. Scenarij sudara broda.....	4
2.1.1. Položaj i opseg oštećenja konstrukcije uslijed sudara prema ABSu	5
2.2. Scenarij nasukavanja broda.....	7
2.2.1. Položaj i opseg oštećenja konstrukcije uslijed nasukavanja prema ABSu	8
2.3. Glavne karakteristike tankera tipa Aframax.....	9
2.4. Lokacija i raspon oštećenja Aframaxa.....	9
3. MOMENT SAVIJANJA NA MIRNOJ VODI OŠTEĆENOG BRODA	11
3.1. Koeficijenti povećanja momenta na mirnoj vodi prema podacima iz literature	11
4. OPTEREĆENJE BRODSKOG TRUPA NA VALOVIMA U JADRANU.....	13
4.1. Meteorološke značajke Jadranskog mora	13
4.1.1. Opis promatranja valova	14
4.1.2. Statistika stanja mora	15
4.1.3. Tabainov spektar za Jadransko more	15
4.2. Odziv broda na morskim valovima.....	17
4.3. Proračun prijenosnih funkcija gibanja i opterećenja	18
4.3.1. Prijenosna funkcija vertikalnog valnog momenta savijanja.....	20
4.4. Najvjerojatnija ekstremna vrijednost valnog momenta u vremenskom periodu tegljenja broda na Jadranu.....	25
5. GRANIČNA ČVRSTOĆA OŠTEĆENOG BRODSKOG TRUPA	27
5.1. Koeficijenti smanjenja preostale čvrstoće prema podacima iz literature.....	28
5.1.1. Računalni program MARS	34
5.2. Usporedba postotaka smanjenja granične čvrstoće	37
6. ODREĐIVANJE FAKTORA SIGURNOSTI.....	38
7. DISKUSIJA	43
8. ZAKLJUČAK.....	44
PRILOZI	45
LITERATURA.....	46

POPIS SLIKA

Slika 1.	Potonuće tankera Prestige.....	1
Slika 2.	Volonteri čiste galicijsku obalu od nafte.....	2
Slika 3.	Uništenje flore i faune, ptica prekrivena naftom	2
Slika 4.	Sudar brodova: LPG Gas Roman i MV Springbok.....	4
Slika 5.	Pretpostavljena lokacija oštećenja uslijed sudara prema ABS-u	6
Slika 6.	Nasukavanje bulkera "Shen Neng 1"	7
Slika 7.	Pretpostavljena lokacija oštećenja uslijed nasukavanja prema ABS-u	8
Slika 8.	Tipični Aframax tanker	9
Slika 9.	Lokacija oštećenja kod sudara u računalnom programu MARS	10
Slika 10.	Lokacija oštećenja kod nasukavanja u računalnom programu MARS	10
Slika 11.	Položaj oštećenja.....	12
Slika 12.	Podjela Jadranskog mora na zone valovlja.....	13
Slika 13.	Tipična „ruža valova“ (zona valovlja 17 u siječnju).....	14
Slika 14.	Preporučeni histogram za tipičnu rutu broda na Jadranu	15
Slika 15.	Tabainov spektar za različita stanja mora.....	16
Slika 16.	Spektar valova sa značajnom valnom visinom $H_{1/3} = 7,5$ m izmjeren 1979. god. 17	
Slika 17.	Analogija njihanja broda i djelovanje elektronskog filtra	18
Slika 18.	Gibanja broda u koordinatnom sustavu.....	19
Slika 19.	Aframax – Raspored stripova duž podvodnog dijela trupa broda (WAVESHIP). 20	
Slika 20.	Aframax – 3D model podvodnog dijela trupa broda (HydroSTAR)	20
Slika 21.	Prijenosne funkcije vertikalnog valnog momenta savijanja dobivene računalnim programom WAVESHIP, HydroSTAR i polu-analitički; $d=\infty$, $v=0$ [čv].....	22
Slika 22.	Prijenosne funkcije vertikalnog momenta savijanja dobivene računalnim programom WAVESHIP i HydroSTAR; $d=\infty$ i $v=5$ [čv]	23
Slika 23.	Prijenosne funkcije vertikalnog momenta savijanja dobivene računalnim programom HydroSTAR; $d=\infty$ i $v=0$ [čv], $d=\infty$ i $v=5$ [čv], $d=50$ [m] i $v=0$ [čv], $d=50$ [m] i $v=5$ [čv]	23
Slika 24.	Prijenosna funkcija vertikalnog momenta savijanja dobivena računalnim programom HydroSTAR; $d=\infty$ i $v=0$ [čv], $d=50$ [m] i $v=0$ [čv]	24
Slika 25.	Valni momenti za period od 1, 5 i 7 dana pri $d = \infty$	25
Slika 26.	Valni momenti za period od 1, 5 i 7 dana pri $d = 50$ [m]	25
Slika 27.	Valni momenti za značajnu valnu visinu $H_{1/3}=7,5$ [m]	26
Slika 28.	Ovisnost momenta savijanja M_{ULT} o zakrivljenosti trupa χ	27
Slika 29.	Konture vertikalnog plastičnog momenta otpora tankera za prijevoz naftnih prerađevina	28
Slika 30.	Različite lokacije oštećenja i odgovarajuća granična čvrstoća.....	29
Slika 31.	Granična čvrstoća naspram lokaciji oštećenja.....	30
Slika 32.	Lokacija oštećenja i odgovarajući granični moment savijanja	32
Slika 33.	Raspon oštećenja na dnu broda naspram graničnog momenta savijanja.....	32
Slika 34.	Krivulja maksimalnog momenta savijanja u ovisnosti o pregibu i progibu.....	34
Slika 35.	Krivulja vertikalnog momenta savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti za brod bez korozije računalnim programom MARS.....	35
Slika 36.	Krivulja vertikalnog momenta savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti za korodirani brod programom MARS.....	36
Slika 37.	Histogram usporedbe momenata i granične čvrstoće prema korodiranosti broda. 38	
Slika 38.	Histogram usporedbe momenata i granične čvrstoće s utjecajem morskog dna ... 39	
Slika 39.	Histogram usporedbe momenata i granične čvrstoće kod nasukavanja za min. i max. oštećenje prema Slici 11	40
Slika 40.	Histogram usporedbe momenata i granične čvrstoće za sudar i nasukavanje	41

Slika 41. Histogram usporedbe momenata i granične čvrstoće za „realistični“ i „najgori scenarij“	42
--	----

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Raspon oštećenja uslijed sudara i nasukavanja.....	9
Tablica 2.	Koeficijent povećanja momenta na mirnoj vodi	11
Tablica 3.	Koeficijent K_{us}	12
Tablica 4.	RIF za različite veličine oštećenja broda.....	31
Tablica 5.	Koeficijenti preostale čvrstoće.....	33
Tablica 6.	Postoci smanjenja granične čvrstoće u odnosu na korodirani brod programom MARS.....	36
Tablica 7.	Granična čvrstoća za oštećeni brod kod sudara i nasukavanja	37
Tablica 8.	Postoci smanjenja granične čvrstoće.....	37
Tablica 9.	Faktori sigurnosti kod sudara i nasukavanja za „realistični scenarij“	43

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
L_{OA}	[m]	duljina broda preko svega
L_{PP}	[m]	duljina broda između okomica
B	[m]	širina broda
T	[m]	gaz broda
D	[t]	istisnina broda
v	[čv]	brzina broda u službi
K		Smith-ov faktor korekcije
C_b		koeficijent istisnine
d	[m]	dubina mora
$F_c(C_b)$		faktor korekcije za blok koeficijent
F_n		Froude-ov broj
$F_v(F_n)$		faktor korekcije brzine
g	[m/s ²]	gravitacijsko ubrzanje
$H_{1/3}$	[m]	značajna valna visina
k	[m ⁻¹]	valni broj
$M_{\text{still water}}$	[kNm]	moment savijanja broskog trupa na mirnoj vodi
M_t	[kNm]	ukupni moment savijanja broskog trupa
M_{ult}	[kNm]	preostala čvrstoća broda
M_{wave}	[kNm]	moment savijanja broskog trupa na valovima
R_a		amplituda odziva
t	[s]	vrijeme
T_z	[s]	nulti period vala
α		parametar
ζ	[m]	podizaj (elevacija) vala
ζ_a	[m]	amplituda vala
η_i		i -ti oblik njihanja ($i = 1 \dots 6$)
λ	[m]	duljina vala
ρ	[kg/m ³]	gustoća vode tj. mora
σ		standardna devijacija, širina krivulje
Φ_w		prijenosna funkcija za vertikalni moment savijanja na valovima
ω	[rad s ⁻¹]	frekvencija vala
ω_m	[rad s ⁻¹]	modalna frekvencija vala
S_ζ	[m ² s ⁻¹]	spektar valova

SAŽETAK

U diplomskom radu je analizirano ponašanje konstrukcije oštećenog naftnog tankera u uvjetima Jadranskog mora.

U prvom dijelu rada opisani su položaj i opseg oštećenja konstrukcije uslijed nasukavanja ili sudara prema uputama klasifikacijskog društva ABS „Guide for Assessing Hull-Girder Residual Strength for Tankers“.

Momenti savijanja oštećenog tankera na mirnoj vodi procijenjeni su pomoću podataka iz literature. U proračunskom dijelu provedeni su proračuni valnog opterećenja konstrukcije računalnim programima WAVESHIP i HydroSTAR te polu-analitičkom metodom određivanja prijenosnih funkcija. Zatim je izračunata najvjerojatnija ekstremna vrijednost valnog momenta savijanja u vremenskom razdoblju tegljenja broda koristeći podatke o statistici valova u Jadranskom moru. Granični moment savijanja neoštećenog trupa tankera određen je pomoću programa MARS klasifikacijskog društva Bureau Veritas, a ista značajka oštećenog trupa procijenjena je na osnovi dostupne literature te prethodno izračunatog momenta neoštećenog presjeka.

Uzimajući u obzir tako određena opterećenja i čvrstoću oštećene brodske konstrukcije, određen je faktor sigurnosti obzirom na kolaps oštećenog trupa kao grednog nosača.

1. UVOD

Ovaj rad je motiviran velikim povećanjem prometa nafte Jadranskim morem koje se očekuje narednih godina. Bez obzira koliko je mala vjerojatnost havarije tankera zbog nevremena, ona se neumitno povećava s povećanjem broja brodova u prometu.

Tanker može biti oštećen uslijed nepažnje posade (eksplozija), sudarom s drugim brodom ili nasukavanjem, a uslijed čega bi došlo do povećanog opterećenja brodske konstrukcije zbog prodora mora te istovremeno do smanjenja njezine čvrstoće. Tada bi i morski valovi mogli postati bitan uzrok preopterećenja konstrukcije.

Potonuće tankera "Prestige" 2002. god. je zorno pokazalo da se kao nastavak takvog scenarija može dogoditi lom trupa na dva dijela i potonuće broda kao najnepovoljniji ishod s istjecanjem velike količine nafte u okoliš (*Slika 1*). Tanker Prestige potonuo je tijekom oluje u studenom 2002., kraj galicijske obale, poznate još zbog čestih brodoloma i kao Obala smrti. Brod jednostruke oplata, star 26 godina (izgrađen je 1976. u Japanu), plovio je pod zastavom



Slika 1. Potonuće tankera Prestige

Bahama. Počeo je tonuti ispred već onečišćene španjolske obale i prepolovio se u pokušaju odvlačenja u dublje vode Atlantika. Krmeni je dio potonuo s većim dijelom nafte. Procijenjeno je da se u more izlilo oko 76 000 m³ nafte. To je bila jedna od najvećih ekoloških i gospodarskih katastrofa koje su pogodile Španjolsku, Francusku i Portugal. Stjenovita obala Galicije teško je stradala (Slika 2.)



Slika 2. Volonteri čiste galicijsku obalu od nafte



Slika 3. Uništenje flore i faune, ptica prekrivena naftom

Galicijски Ekonomski institut Barrie de la Maza procjenjuje da je sanacija štete same galicijske obale koštala 2,5 milijarde € bez uzimanja u obzir nenadoknadivih gubitaka biljnoga i životinjskog svijeta (*Slika 3*) [3]. Predviđa se da bi morski život mogao još najmanje deset godina osjećati posljedice zbog veličine onečišćenja.

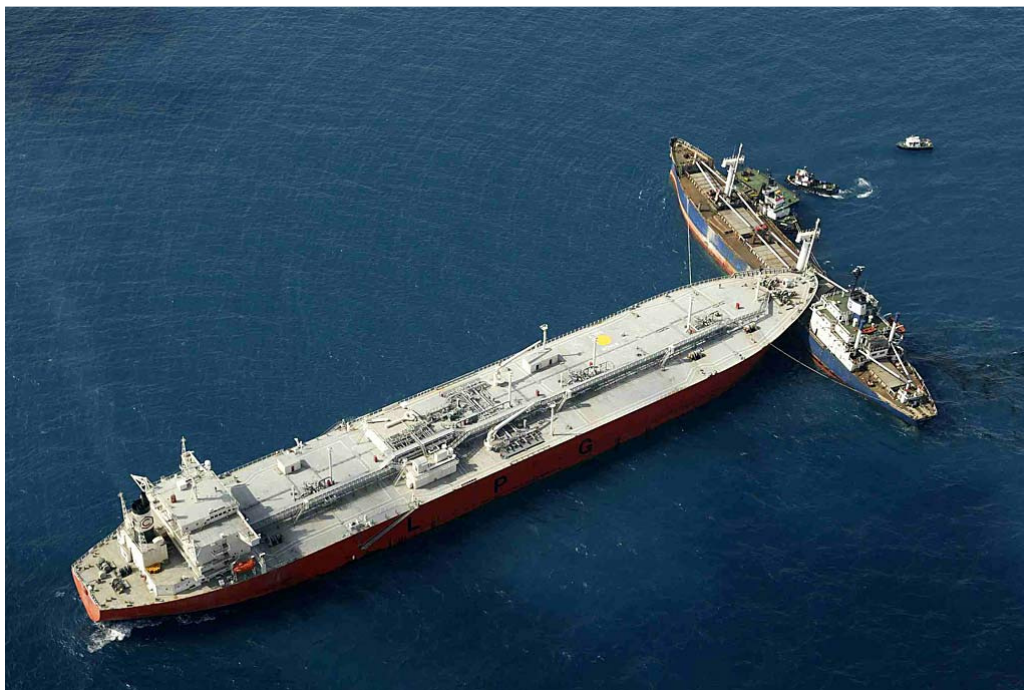
Količina nafte koja se trenutno transportira Jadranom iznosi 85-100 milijuna tona godišnje, s tendencijom snažnog porasta te se svakih 6 godina promet povećava za cca. 10%. Do nedavno se 80% nafte transportiralo kroz talijanske luke Veneciju i Trst, ali situacija bi se promijenila s izglednim potpisivanjem sporazuma za prijevoz ruske nafte na svjetska tržišta preko hrvatskog terminala Omišalj, koji je atraktivan zbog svog povoljnog geografskog položaja. U zatvorenom morskom bazenu, kakvo je Jadransko more, s relativno niskom razinom aktivnosti morskih struja i valova, pomorska nesreća sa značajnim istjecanjem nafte u more izazvala bi nepovratnu ekološku katastrofu s nesagledivim ekonomskim gubicima.

2. SUDAR I NASUKAVANJE TANKERA

Položaj i opseg oštećenja konstrukcije uslijed nasukavanja ili sudara pretpostavljen je prema uputama klasifikacijskog društva ABS „Guide for Assessing Hull-Girder Residual Strength for Tankers“, 1995. god.

2.1. Scenarij sudara broda

Određivanje oštećenja broda uključenog u pojedini sudar sastoji se od definicije opterećenja tijekom sudara i primjene odgovarajuće metode proračuna odziva konstrukcije. Opterećenje je razumno definirati skupom ulaznih parametara te ovisi, između ostalog, o relativnoj krutosti struktura koje su se sudarile. Posebice gledano, opis opterećenja broda uključenog u sudar brodova uključuje brzinu brodova, geometriju sudara (lokaciju oštećenja), kut udara, relativnu orijentaciju sudarenih plovila, stanje krcanja (obično se promatraju puno stanje i balastno stanje), gaz, trim, oblik pramca, konstrukcijsku izvedbu trupa i pramca, stanje mora, uvjete vjetra i struje i razinu održavanja broda. Ljudski faktor također može utjecati na posljedice, posebice na samu mogućnost sudara, kao i detalje događaja.



Slika 4. Sudar brodova: LPG Gas Roman i MV Springbok

Na *Slici 4* je prikazan sudar brodova 2003. god. na prilazu Singapurske luke. MT Gas Roman (230 m dugačak i 37 m širok, izgrađen 1990. god.) nakrcan sa 44 000 t ukapljenog plina sudario se sa MV Springbok (brod za prijevoz općeg tereta, nosivosti 15 000 t, 144 m dugačak i 20 m širok, izgrađen 1979.) nakrcanog s 3 165 t drveta.

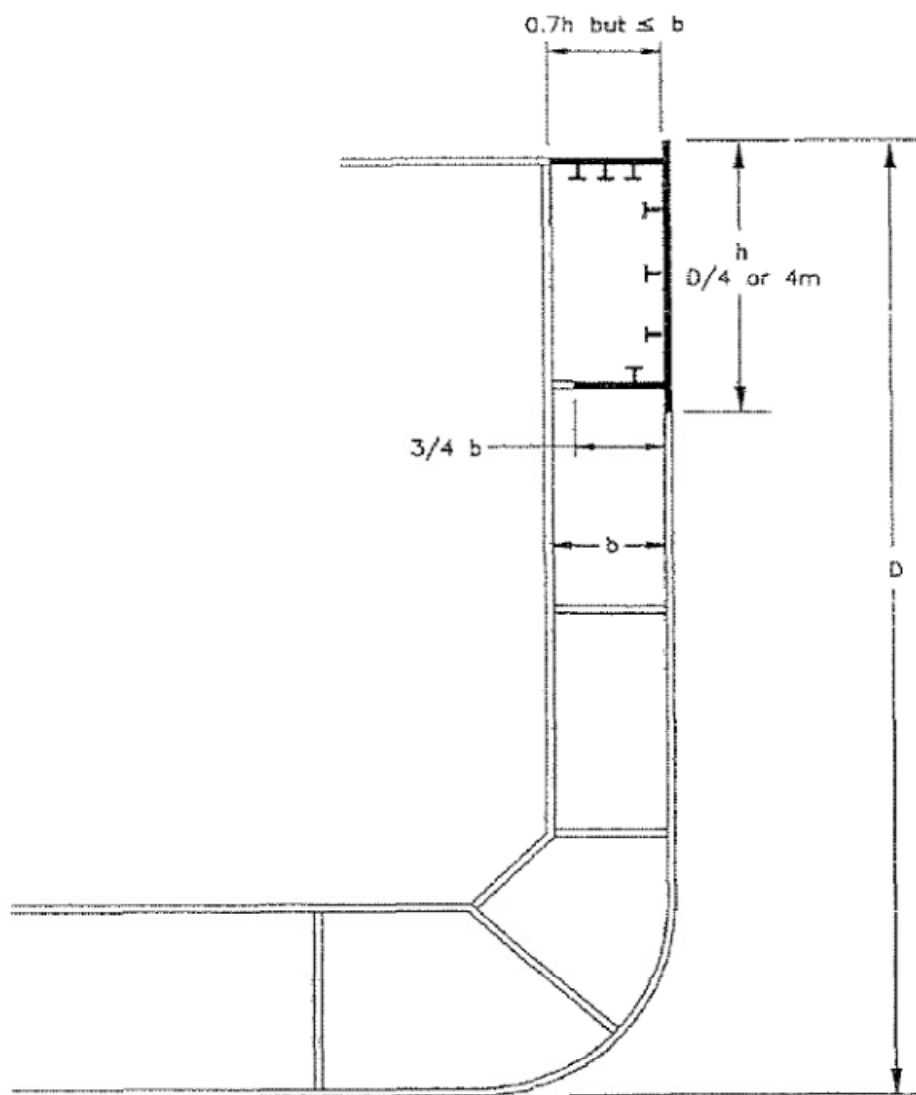
2.1.1. Položaj i opseg oštećenja konstrukcije uslijed sudara prema ABSu

Pretpostavlja se da je najnepovoljnija lokacija oštećenja konstrukcije boka na nadvođu bilo gdje između 0,15L iza pramčane okomice i 0,2L ispred krmene okomice, gdje treba ispitati barem dvije lokacije; jednu u predjelu sredine broda, te drugu u predjelu visokih smičnih sila.

Pretpostavlja se da se oštećenje izazvano sudarom nalazi na gornjem dijelu oplata boka, ispod lima proveze palube čvrstoće, uključujući isti.

Za sljedeće članove valja pretpostaviti da su oštećeni i iste isključiti, potpuno ili djelomično, iz proračuna momenta otpora poprečnog presjeka trupa:

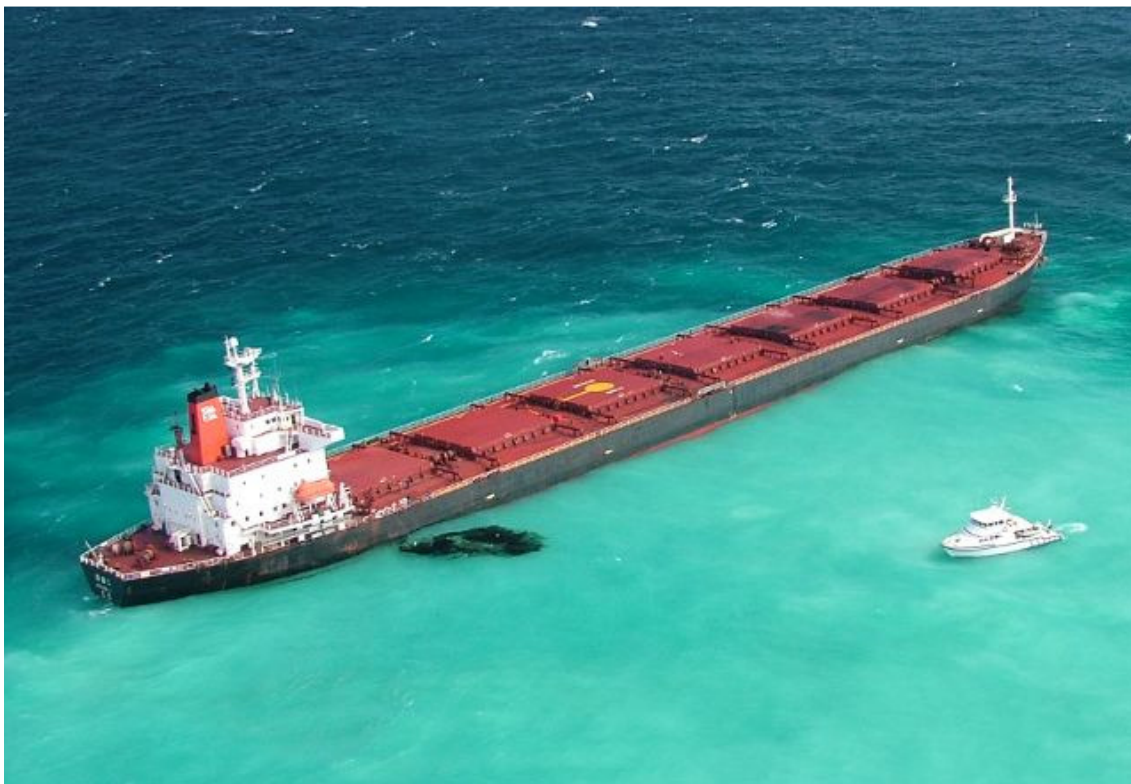
- vanjsku oplatu boka udaljena vertikalno prema dolje 4 m ili $D/4$, ovisno što je veće, od gornjeg ruba završnog voja, gdje je D visina broda.
- oplatu palube uključujući provezu koja se proteže od vanjske do unutarnje oplata boka.
- bočne proveze i platforme unutar oštećene zone protežu se za 75% širine dvoboka, tj. $\frac{3}{4} B$, kao što je prikazano na *Slici 5*.
- svi uzdužnjaci palube i boka i uzdužne ukrepe pričvršćene za oštećenu oplatu.



Slika 5. Pretpostavljena lokacija oštećenja uslijed sudara prema ABS-u

2.2. Scenarij nasukavanja broda

Proces nasukavanja broda uključuje velike kontaktne sile, urušavanje konstrukcije trupa, te proboj vanjske oplata, dok se istovremeno javlja međudjelovanje s globalnim pomacima i cjelokupnom čvrstoćom trupa, što može uzrokovati slom brodskog trupa kao grednog nosača. Osobine morskog dna, topologija dna, kao i scenariji nasukavanja su odlučujući faktori koji utječu na proces oštećivanja. Adekvatne informacije o topologiji morskog dna su vrlo ograničene. Za većinu analitičkih modela za nasukavanje broda korištenih u raznim objavljenim radovima pretpostavlja se da stijene uzrokuju otvore u velikim dijelovima konstrukcije dna.



Slika 6. Nasukavanje bulkera "Shen Neng 1"

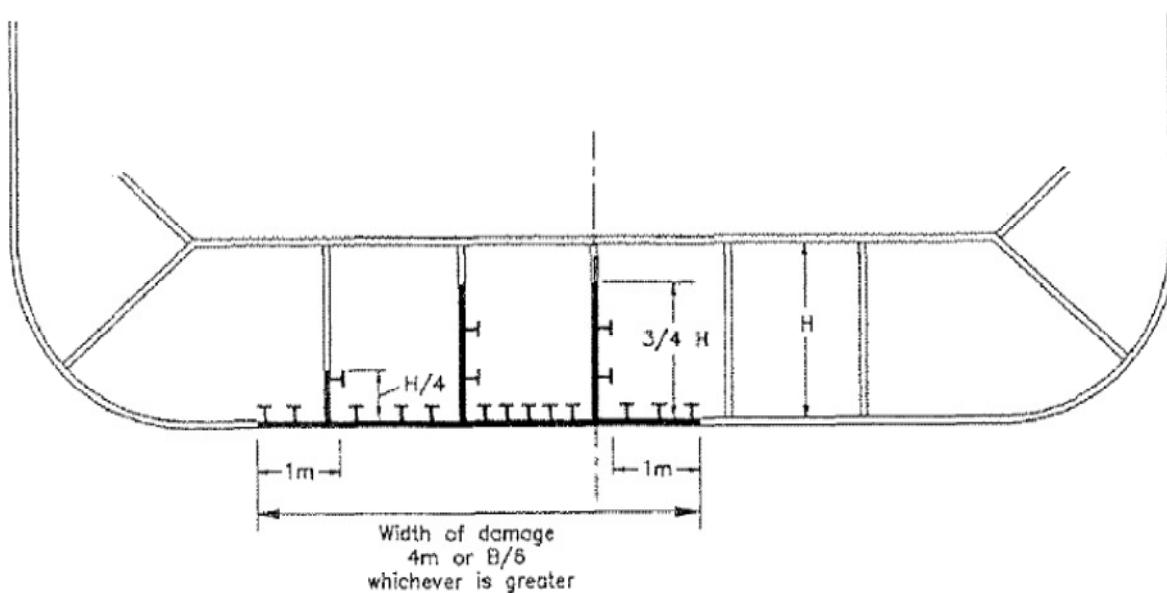
Na *Slici 6* iz bulkera nakrcanog sa 65 000 t ugljena curi loživo ulje koje se proširilo na površinu od 3 km duljine i 100 m širine.

2.2.1. Položaj i opseg oštećenja konstrukcije uslijed nasukavanja prema ABSu

Pretpostavlja se da je najnepovoljnija lokacija oštećenja strukture dna bilo gdje na ravnom dnu unutar prednjeg dijela trupa broda u rasponu od $0,5L$ do $0,2L$ od pramčane okomice, te u tom dijelu treba biti ispitana bar jedna lokacija. Za strukturu dna se pretpostavlja da je oštećena duž znatnog dijela trupa, a oštećeni konstrukcijski elementi trebaju biti isključeni iz proračuna trupa kao nosača.

Za sljedeće članove treba pretpostaviti da su oštećeni, te ih isključiti, potpuno ili djelomično, iz momenta otpora poprečnog presjeka trupa:

- vanjska oplata dna širine 4m ili $B/6$, ovisno što je veće, gdje je B širina broda.
- pretpostavlja se da su nosači dvodna koji su vezani na oštećenu oplatu i sami oštećeni i neučinkoviti do slijedećeg postotka visine nosača:
 - 75% za nosače koji se nalaze između graničnih zona .
 - 25% za nosače koji se nalaze unutar 1m udaljenosti od granične zone oštećene oplata
- svi uzdužnjaci dna unutar oštećene oplata dna i uzdužne ukrepe unutar oštećenih dijelova nosača (Slika 7.)



Slika 7. Pretpostavljena lokacija oštećenja uslijed nasukavanja prema ABS-u

2.3. Glavne karakteristike tankera tipa Aframax

U radu je analiziran tipičan tanker tipa Aframax sa sljedećim glavnim značajkama:

Tip	Tanker za prijevoz sirove nafte
Duljina preko svega, L_{OA}	246,00 [m]
Duljina između okomica, L_{PP}	236,00 [m]
Širina, B	42,00 [m]
Visina, H	21,00 [m]
Gaz, T	15,60 [m]
Istisnina, D	114000 [t]

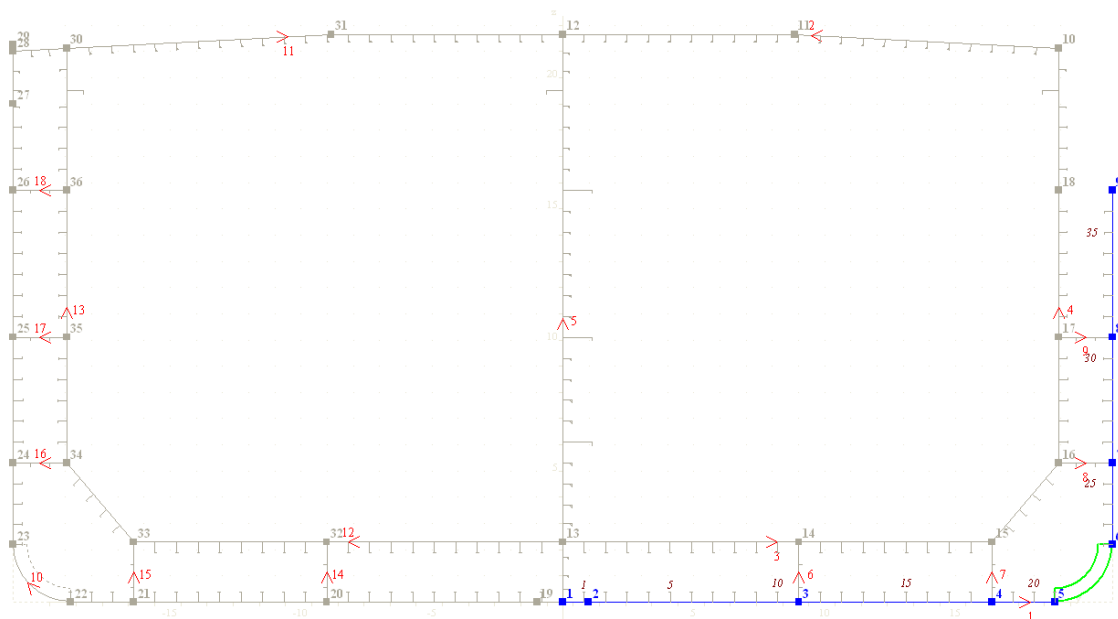


Slika 8. Tipični Aframax tanker

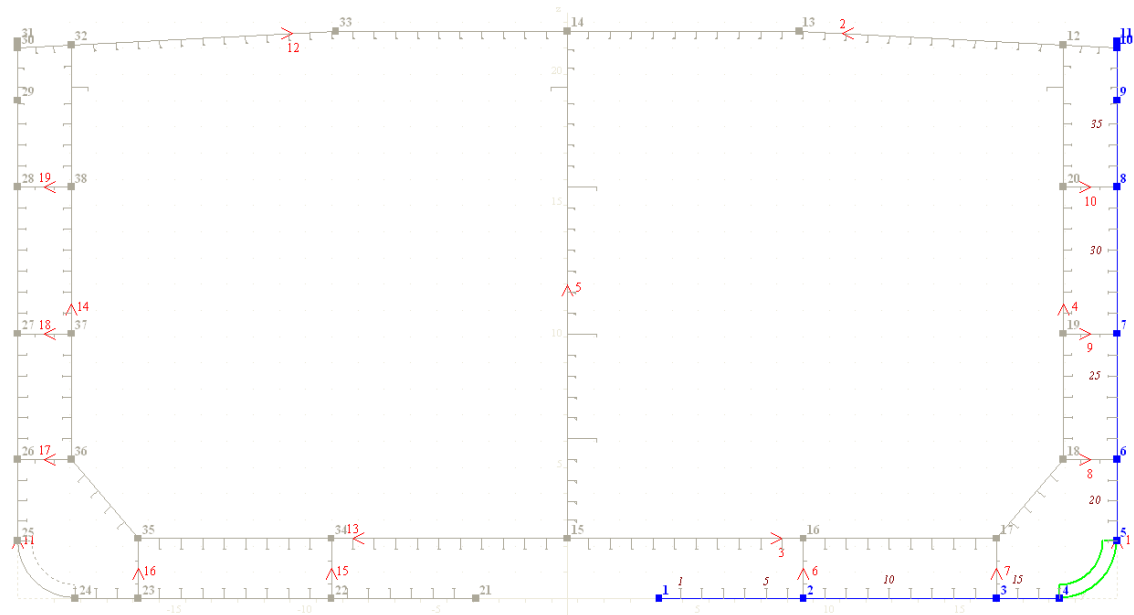
2.4. Lokacija i raspon oštećenja Aframaxa

Tablica 1. Raspon oštećenja uslijed sudara i nasukavanja

	OŠTEĆENJE SUDAROM	OŠTEĆENJE NASUKAVANJEM
širina:	2,05 m	7,00 m
visina:	5,30 m	2,30 m



Slika 9. Lokacija oštećenja kod sudara u računalnom programu MARS



Slika 10. Lokacija oštećenja kod nasukavanja u računalnom programu MARS

3. MOMENT SAVIJANJA NA MIRNOJ VODI OŠTEĆENOG BRODA

3.1. Koeficijenti povećanja momenta na mirnoj vodi prema podacima iz literature

U *Tablici 2* su dani koeficijenti povećanja momenta savijanja na mirnoj vodi u odnosu na lokaciju i raspon oštećenja koja su prikazana na *Slici 11* prema istraživanju koji su proveli A. W. Hussein, C. Guedes Soares [1]. Moment savijanja na mirnoj vodi u oštećenom stanju dan je sljedećim pojednostavljenim izrazom:

$$M_s^D = K_{us} \cdot M_s$$

Gdje je:

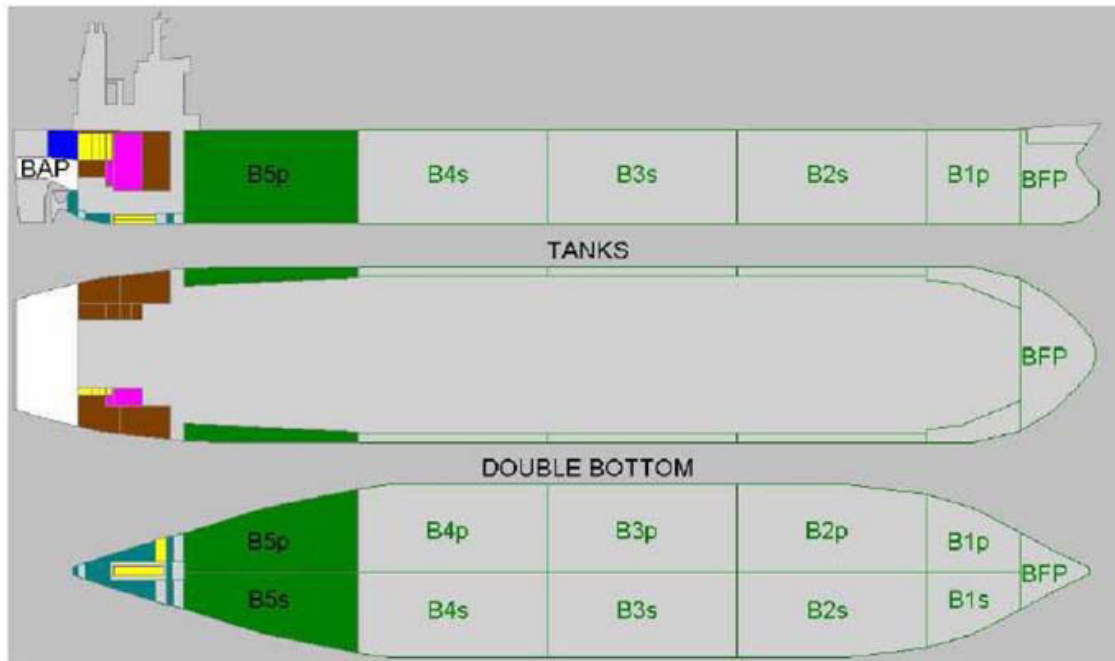
M_s^D – moment savijanja na mirnoj vodi u oštećenom stanju

K_{us} – koeficijent povećanja momenta savijanja na mirnoj vodi

M_s – moment savijanja na mirnoj vodi za neoštećeni trup

Tablica 2. Koeficijent povećanja momenta na mirnoj vodi

Pozicija oštećenja:	Moment savijanja na mirnoj vodi [MNm]	K_{us}
Neoštećeni brod	2226,7	0
B 3P	3221,4	1,45
B 3S	3222,6	1,45
B 3 P+S	4168,4	1,87
B 4P	3018,7	1,36
B 4S	3016,7	1,35
B 4 P+S	3787,4	1,70
B 3+4 i P+S	5304,1	2,38



Slika 11. Položaj oštećenja

U Tablici 3 su prikazani koeficijenti povećanja momenta na mirnoj vodi [K_{us}] prema različitoj literaturi.

Tablica 3. Koeficijent K_{us}

Koeficijent K_{us}			
Autori:	god.		Nasukavanje
ABS	1995.	Pregib	1,10
		Progib	0,90
Rui M. Luis	2009.	Pregib	1,10
		Progib	1,50
A.W.Hussein i C.Souares	2009.	Pregib	-
		Progib	1,45 ÷ 2,38
H.Jia i T.Moan	2008.	Pregib	-
		Progib	1,49
E.Rizzuto i dr.	2010.	Pregib	-
		Progib	1,52

4. OPTEREĆENJE BRODSKOG TRUPA NA VALOVIMA U JADRANU

4.1. Meteorološke značajke Jadranskog mora

Jadransko more proteže se od jugoistoka prema sjeverozapadu i ima približno eliptičan oblik. Dvije glavne vrste vjetrova na tom području su bura i jugo. Bura je jak i hladan vjetar koji puše na mahove iz sjeveroistočnog kvadranta i uglavnom je izražena na sjevernom dijelu Jadranskog mora. Jugo puše duž cijelog Jadrana, uglavnom iz smijera južnog i jugoistočnog kvadranta, te je umjerenog do snažnog intenziteta. Bura i jugo pušu olujnom snagom u prosjeku tri puta godišnje, u trajanju od 1 do 17 sati. Visina valova koji se razvijaju u Jadranskom moru ograničena je kako trajanjem, tako i provjetrištem. U slučaju bure, koja puše usporedno s kraćom stranicom fiktivnog pravokutnika koji predstavlja Jadransko more, provjetrište je dominantni ograničavajući faktor, a zbog prilično silovitog polja brzina koje bura postiže razvijaju se strmi i relativno niski valovi. Jugo je, u usporedbi s burom, postojaniji vjetar koji puše uzduž dulje stranice Jadranskog mora gdje je provjetrište mnogo veće, dok je maksimalna olujna brzina manja nego kod bure. Stoga jugo stvara više valove manje strmine nego bura.

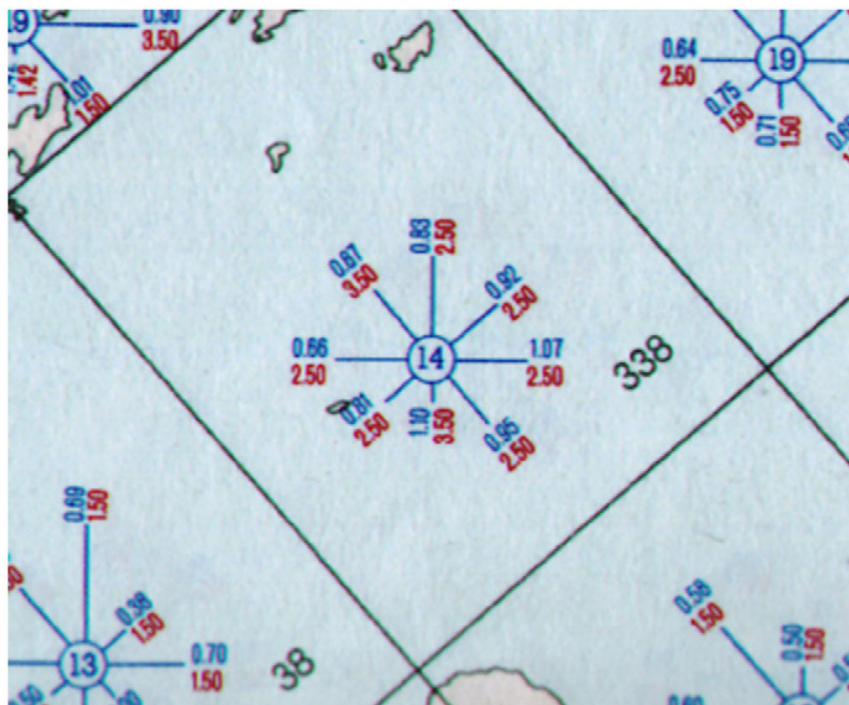


Slika 12. Podjela Jadranskog mora na zone valovlja

4.1.1. Opis promatranja valova

Brojnost pojava stanja mora različitih intenziteta za Jadransko more prikupljena je meteorološkim opažanjima s trgovačkih i istraživačkih brodova od 1957. do 1971. godine, uz ukupan broj od 43 274 potpunih meteoroloških opažaja. Rezultati opažanja objavljeni su u Klimatološkom atlasu Hidrografskog instituta Hrvatske 1979.god. Meteorološki su podaci grupirani u zone valovlja koje predstavljaju „četverokuti“ sa stranicama čija duljina odgovara jednom stupnju geografske širine i dužine (*Slika 12*). Klimatološki atlas sadrži mjesečne prosjeke učestalosti smjera i visine valova s maksimalnim opaženim visinama za svaki smjer vala.

Podaci u atlasu predstavljeni su u obliku „ruže valova“ za svaki mjesec i zonu ponaosob. Tipična „ruža valova“ (zona valovlja broj 17 u siječnju) prikazana je na *Slici 13*. Broj u kutu svake zone predstavlja ukupni broj opažanja valova za određenu zonu, dok broj u krugu, u središtu svake „ruže“, predstavlja postotak mirnog mora (valovi tako mali da ih je nemoguće mjeriti). Gornji brojevi na svakoj crtici („kraku“) predstavljaju prosječnu značajnu valnu visinu promatranih valova iz pojedinog smijera, dok donji broj označava maksimalnu značajnu valnu visinu ikad uočenu iz tog smijera. Dužina crtice u svakom smijeru označava relativnu učestalost valova koji dolaze iz smijera pojedine crtice u odnosu na sve smjerove.

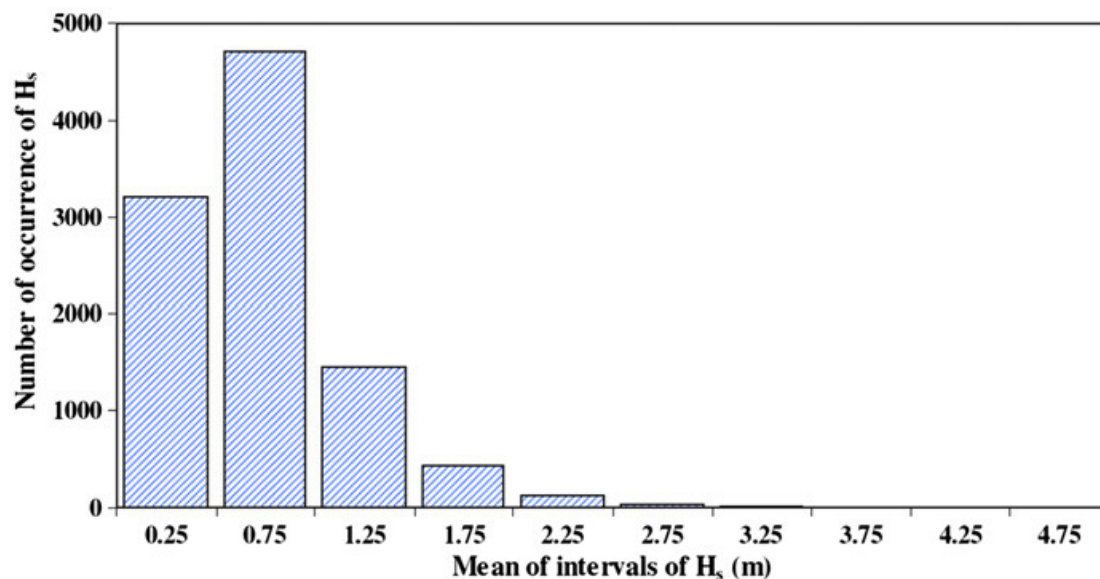


Slika 13. Tipična „ruža valova“ (zona valovlja 17 u siječnju)

4.1.2. Statistika stanja mora

Podaci su digitalizirani tako da su očitavanja s „ruže valova“ raspodijeljena u intervale od 0 do 5 metara, s korakom od 0.5 m. Stoga su srednje vrijednosti intervala redom 0.25, 0.75, ..., 4.75 m. Za svaku zonu valovlja i smijer nailaska valova računat je broj stanja mora.

Pretpostavljeno je da reprezentativni plovni put za tanker u Jadranskom moru prolazi zonama 5, 10, 11, 16, 17, 18, 22, 23, 24 i 27 prema *Slici 12*. Na toj osnovi je izveden histogram pojava stanja mora temeljen na troparametarskoj Weibullovoj razdiobi za reprezentativni plovni put.



Slika 14. Preporučeni histogram za tipičnu rutu broda na Jadranu

Slika 14 predstavlja 10 000 stanja mora koja su simulirana iz funkcije gustoće vjerojatnosti. Taj je histogram reprezentativan za rutu broda na Jadranskom moru.

4.1.3. Tabainov spektar za Jadransko more

Tabain je sproveo neprekidno eksperimentalno istraživanje vjetrom nastalih valova na Jadranskom moru od 1967. do 1977. godine, a u svrhu prikupljanja informacija o odnosu brzine vjetra i značajne valne visine radi određivanja projektnog spektra valova pri projektiranju ratnih brodova. Dobivena je skala stanja mora i empirijska formula spektra. Usporedbom s drugim autorima te mnogim primjenama u projektiranju brodova i inženjerstvu

morske tehnologije ustanovljeno je da formula daje dobre rezultate pri opisu izmjerenih spektara valova.

Tabainov spektar postavljen je u obliku:

$$S_{\zeta}(\omega) = 0,862 \frac{0,0135 g^2}{\omega^5} \exp\left(-\frac{5,186}{\omega^4 H_{1/3}^2}\right) 1,63^{\exp\left(-\frac{(\omega-\omega_m)^2}{2\sigma^2 \omega_m^2}\right)}$$

gdje je modalna frekvencija ω_m vezana za značajnu valnu visinu izrazom:

$$\omega_m = 0,32 + \frac{1,8}{H_{1/3} + 0,6}$$

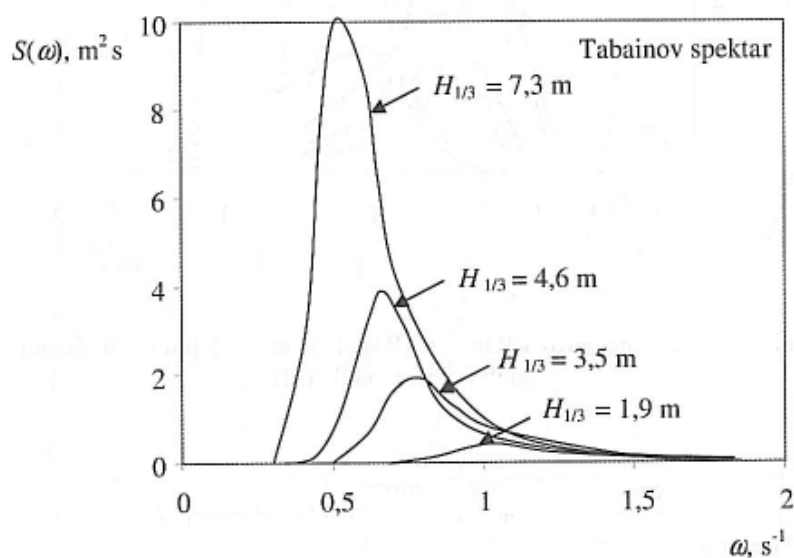
Parametar σ može poprimiti sljedeće vrijednosti:

$$\sigma = 0,08 \text{ za } \omega < \omega_m$$

$$\sigma = 0,1 \text{ za } \omega > \omega_m$$

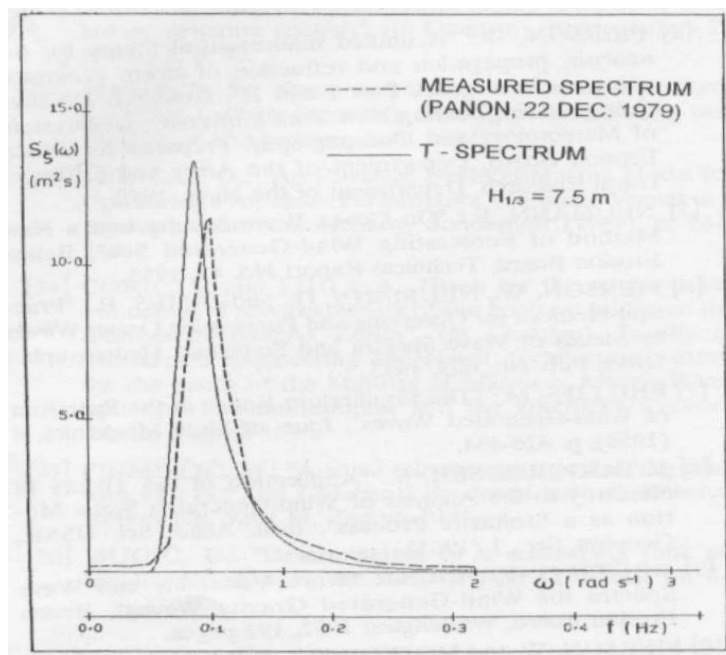
koje vrijede za lijevu odnosno desnu stranu krivulje. Za Jadransko more vrijedi da je vršni period unutar vrijednosti:

$$\sqrt{11H_{1/3}} \langle T_p \rangle \sqrt{24H_{1/3}}$$



Slika 15. Tabainov spektar za različita stanja mora

Osim spektra valova Tabain je postavio odnos skale Jadranskog mora i njezina odnosa prema skali stanja mora Svjetske meteorološke organizacije SMO (engl. *World Meteorological Organisation WMO*). Ustanovljeno je da je stanje mora 7 ($H_{1/3}=6,1 \div 9,1$ m) najteže stanje koje se na Jadranskom moru može očekivati uz valne duljine do maksimalno 80 m i nulte periode do maksimalno 10,5 s. Na *Slici 16* je prikazan najveći do sada zabilježen spektar valova na Jadranu.

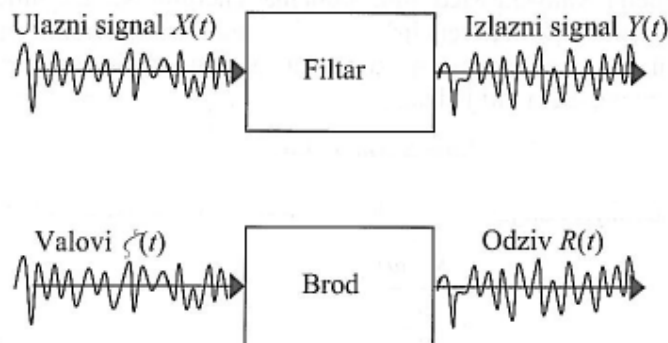


Slika 16. Spektar valova sa značajnom valnom visinom $H_{1/3} = 7,5$ m izmjeren 1979. god.

4.2. Odziv broda na morskim valovima

Odziv broda definiramo kao ponašanje broda na valovima; njegovo njihanje i opterećenje. Analiza pomorstvenosti primjenjuje njegov odziv na morskim valovima radi procjene operativnosti i sigurnosti na nemirnom moru.

Brod u tom slučaju promatramo kao "filar" koji mijenja ulazni "signal" (morske valove). Ulazni signal sadrži komponente različitih frekvencija koje se povećavaju ili smanjuju te tvore izlazni signal ovisno o svojstvu "filara" (*Slika 17*).



Slika 17. Analogija njihanja broda i djelovanje elektronskog filtra

Linearna teorija je najjednostavnija teorija progresivnog površinskog vala, a može vrlo dobro opisati valovljem izazvana gibanja i opterećenja brodova, poluuronjivih platformi i ostalih konstrukcija velikog volumena.

4.3. Proračun prijenosnih funkcija gibanja i opterećenja

Prijenosna funkcija predstavlja najpogodniji način prikazivanja odziva plovnog objekta na harmonijskim valovima različitih frekvencija, a definira se kao omjer amplitude odziva R_a i amplitude vala ζ_a .

$$|H(\omega)| = \left| \frac{R_a}{\zeta_a} \right|$$

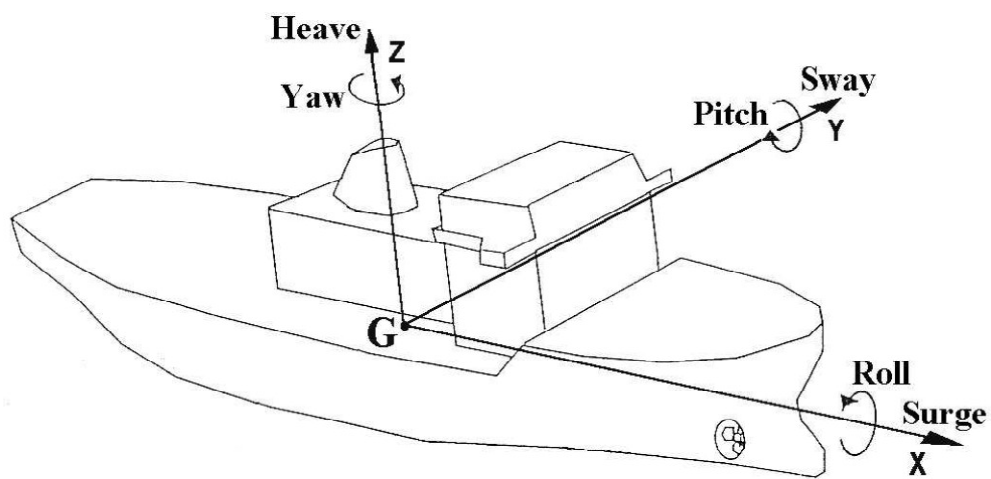
Njihanje broda na valovima podrazumjeva model sa 6 stupnjeva slobode gibanja:

Translacijski stupnjevi slobode su:

- η_1 – zalijetanje (engl. surge)
- η_2 – zanošenje (engl. sway)
- η_3 – poniranje (engl. heave)

Rotacijski stupnjevi slobode su:

- η_4 – ljuljanje (engl. roll)
- η_5 – posrtanje (engl. pitch)
- η_6 – zaošijanje (engl. yaw)

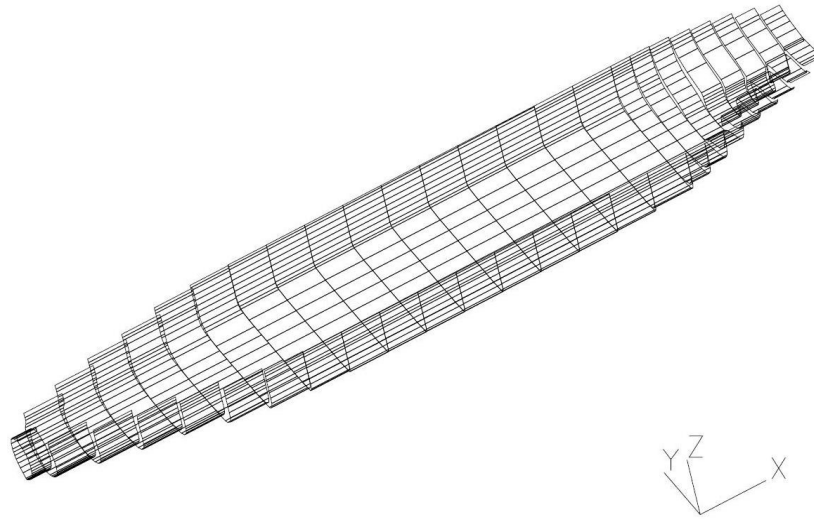


Slika 18. Gibanja broda u koordinatnom sustavu

4.3.1. Prijenosna funkcija vertikalnog valnog momenta savijanja

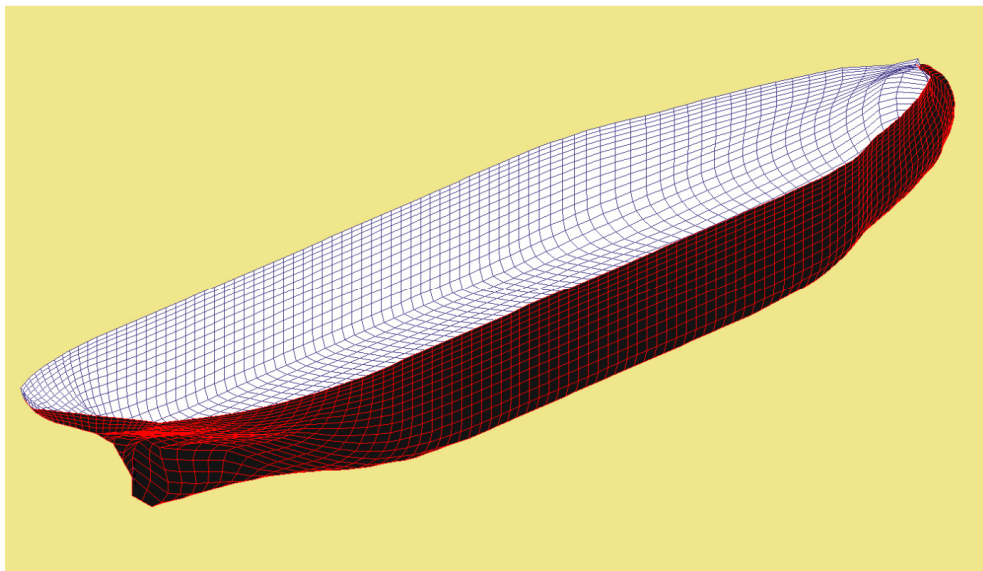
Prijenosne funkcije vertikalnog valnog momenta savijanja u ovom radu su određene na 3 načina:

- računalnim programom **WAVESHIP** koji primjenjuje linearnu vrpčastu teoriju



Slika 19. Aframax – Raspored stripova duž podvodnog dijela trupa broda (WAVESHIP)

- računalnim programom **HydroSTAR** koji primjenjuje 3D radijacijsko-difrakcijsku teoriju.



Slika 20. Aframax – 3D model podvodnog dijela trupa broda (HydroSTAR)

- **polu-analitički određena prijenosna funkcija**

Prijenosna funkcija vertikalnog momenta savijanja na sredini broda je računata u dosadašnjim istraživanjima koristeći polu-analitički pristup koji su predložili Jensen i Mansour. Prema tom pristupu prijenosna funkcija ϕ_M za vertikalni moment savijanja na valovima dana je u sljedećem zapisu:

$$\frac{\phi_M}{\rho g B L^2} = \kappa \frac{1 - kT}{(kL)^2} \left[1 - \cos\left(\frac{kL}{2}\right) - \frac{kL}{4} \sin\left(\frac{kL}{2}\right) \right] F_V(F_n) F_C(C_b)$$

Gdje je k broj valova povezan sa frekvencijom vala ω preko jednadžbe $\omega^2 = kg$. Dok je L duljina broda, a κ Smith-ov faktor korekcije dan približno kao:

$$\kappa \cong e^{-kT}$$

gdje je T gaz. $F_V(F_n)$ je faktor korekcije brzine i iznosi:

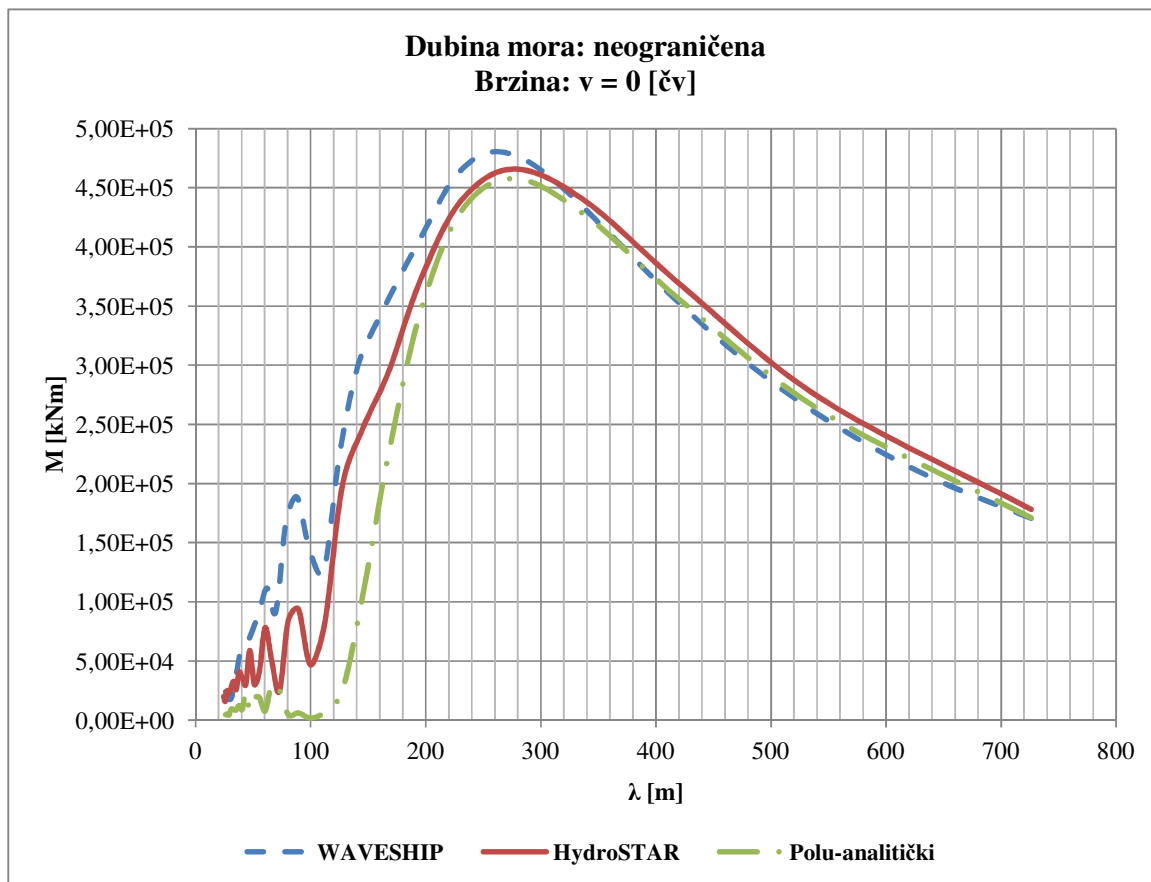
$$F_V(F_n) = 1 + 3F_n^2$$

što vrijedi za Froude-ov broj $F_n < 0,3$.

$F_C(C_b)$ je korekcijski faktor za blok koeficijent dan kao:

$$F_C(C_b) = \left[(1 - \vartheta)^2 + 0.6\alpha(2 - \vartheta) \right]; \quad \vartheta = 2.5(1 - C_b); \quad C_b = \max(0.6, C_b)$$

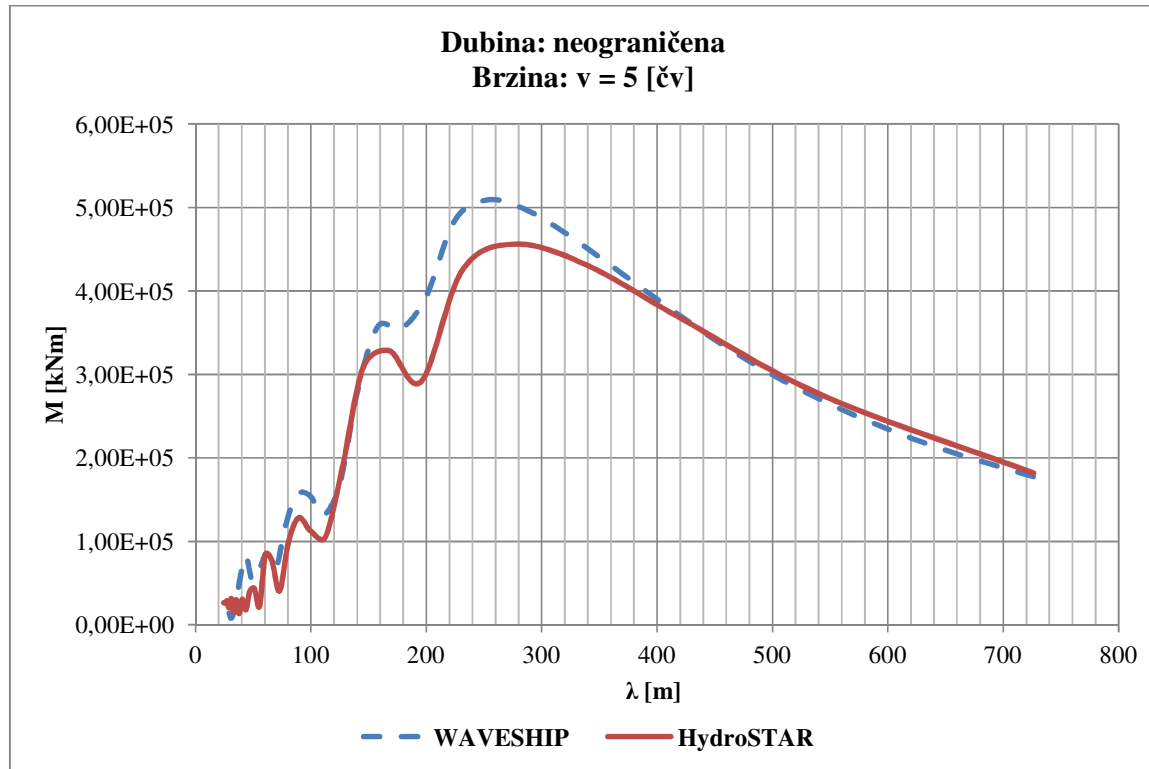
Dijagram na *Slici 21* prikazuje usporedbu prijenosnih funkcija vertikalnog valnog momenta savijanja za sredinu broda dobivenih računalnim programima WAVESHIP, HydroSTAR i polu-analitički. Uočljivo je dobro slaganje rezultata po sve tri metode.



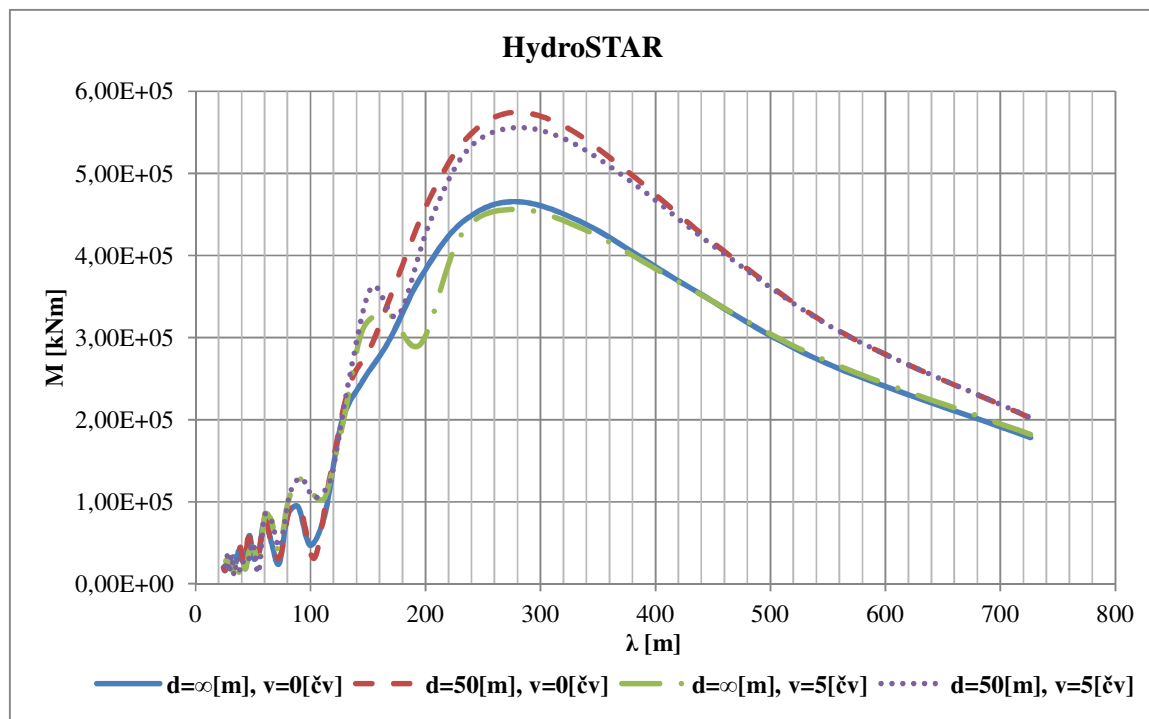
Slika 21. Prijenosne funkcije vertikalnog valnog momenta savijanja dobivene računalnim programom WAVESHIP, HydroSTAR i polu-analitički; $d=\infty$, $v=0$ [čv]

Na *Slici 22* prikazana je usporedba rezultata dobivenih računalnim programom WAVESHIP i HydroSTAR za neograničenu dubinu mora i za brzinu od 5 čv.

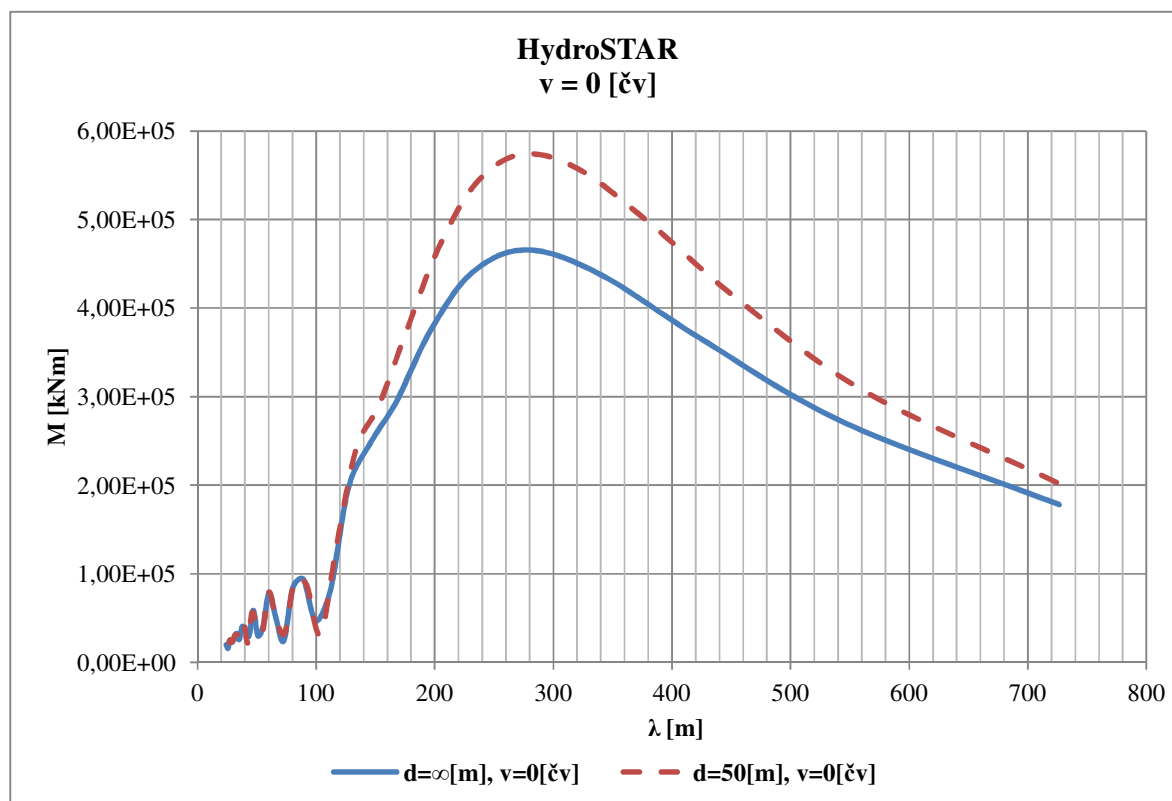
Na dijagramu sa *Slike 23* se vidi da utjecaj dubine mora znatno utječe na rezultate, dok je utjecaj male brzine ($v=5$ čv) neznatan. Stoga dalje nećemo uzimati u obzir brzinu tegljenja broda. *Slika 24* prikazuje prijenosne funkcije vertikalnog momenta savijanja dobivene računalnim programom HydroSTAR za beskonačnu dubinu i dubinu od 50 m.



Slika 22. Prijenosne funkcije vertikalnog momenta savijanja dobivene računalnim programom WAVESHIP i HydroSTAR; $d=\infty$ i $v=5$ [čv]

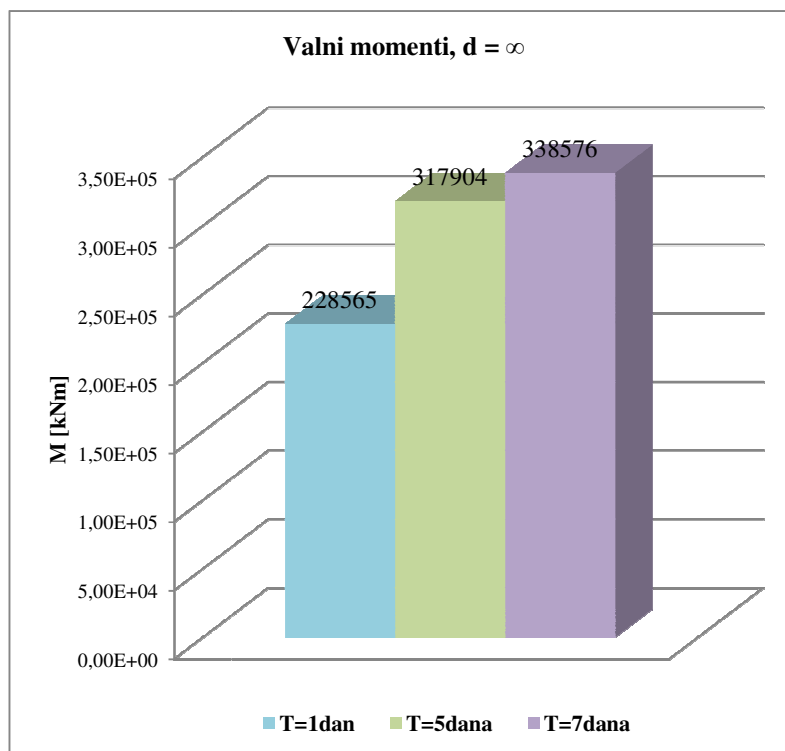


Slika 23. Prijenosne funkcije vertikalnog momenta savijanja dobivene računalnim programom HydroSTAR; $d=\infty$ i $v=0$ [čv], $d=\infty$ i $v=5$ [čv], $d=50$ [m] i $v=0$ [čv], $d=50$ [m] i $v=5$ [čv]

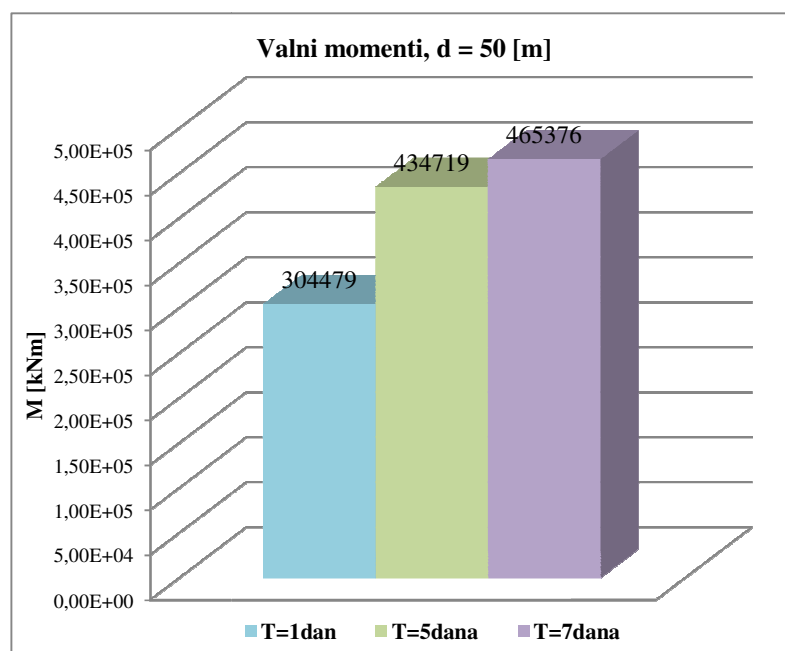


Slika 24. Prijenosna funkcija vertikalnog momenta savijanja dobivena računalnim programom HydroSTAR; $d=\infty$ i $v=0$ [čv], $d=50$ [m] i $v=0$ [čv]

4.4. Najvjerojatnija ekstremna vrijednost valnog momenta u vremenskom periodu tegljenja broda na Jadranu



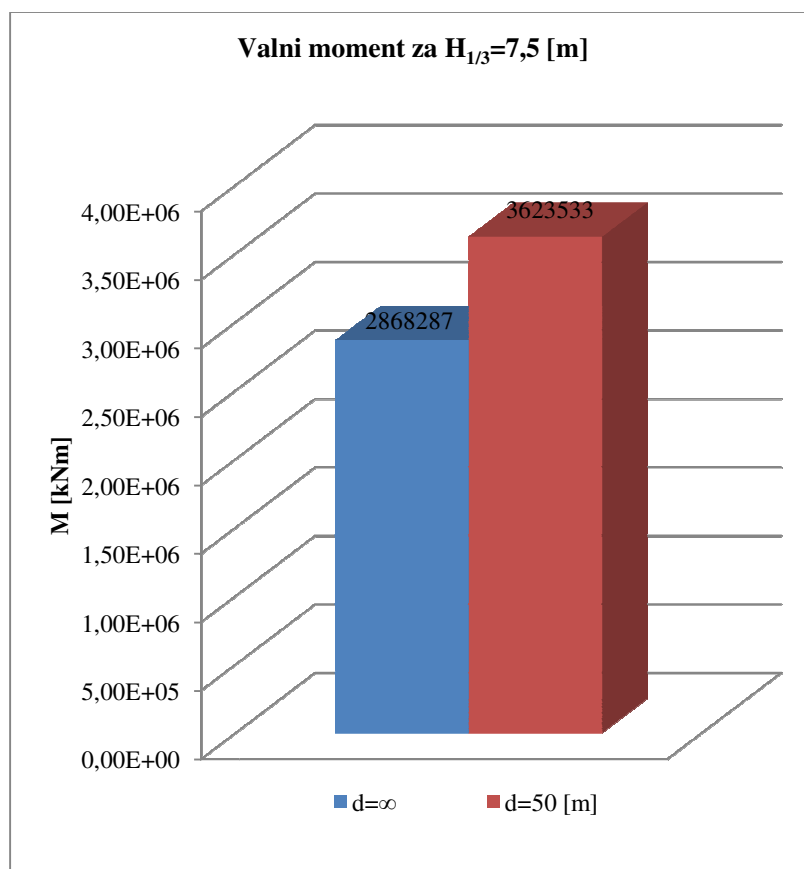
Slika 25. Valni momenti za period od 1, 5 i 7 dana pri $d = \infty$



Slika 26. Valni momenti za period od 1, 5 i 7 dana pri $d = 50$ [m]

Histogrami na *Slikama 25 i 26* predstavljaju najvjerojatniju ekstremnu vrijednost valnog momenta u vremenskom periodu od 1, 5 i 7 dana na Jadranu za neograničenu dubinu (*Slika 25*) i dubinu od 50 m (*Slika 26*).

Histogram na *Slici 27* predstavlja ekstremnu vrijednost valnog momenta s vjerojatnošću premašivanja 1% u 3 sata za najveću do sad zabilježenu značajnu valnu visinu na Jadranu $H_{1/3}=7,5$ m pri neograničenoj dubini mora i dubini od 50 m.

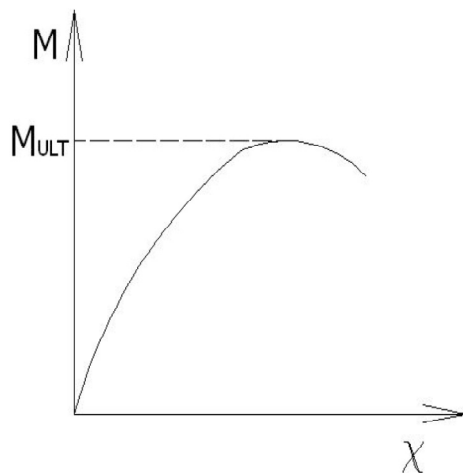


Slika 27. Valni momenti za značajnu valnu visinu $H_{1/3}=7,5$ [m]

5. GRANIČNA ČVRSTOĆA OŠTEĆENOG BRODSKOG TRUPA

Klasifikacijska društva sve više predaju važnosti čvrstoći broorskoga trupa. Prema Povjerenstvu za graničnu čvrstoću na simpoziju ISSC 2001 održanom u Tokyu raspoloživi postupci za procjenu granične čvrstoće broorskoga trupa mogu se klasificirati na dva načina. Jedan je način provođenjem analize progresivnoga sloma, a drugi je izravno računanje granične čvrstoće primjenjujući empirijske i teorijske izraze. Najtočniji postupak za analizu progresivnoga slamanja jest analiza velikih elastoplastičnih deformacija koristeći metodu konačnih elemenata koja, međutim, zahtijeva znatne računalne resurse, pa je preporučeno koristiti jednostavniji postupak. Smithovom pojednostavljenom metodom omogućena je relativno velika točnost u oponašanju progresivnoga sloma broorskoga trupa pri uzdužnom savijanju. U pojednostavljenim postupcima analize progresivnoga sloma, točnost rezultata uvelike ovisi o točnosti određivanja ponašanja u tijeku sloma svakoga pojedinog strukturnog elementa.

Od svih čimbenika najveći utjecaj na graničnu čvrstoću imaju debljina opločenja i dimenzije ukrepa kao i granica razvlačenja materijala. Za uzdužni globalni slom broorskoga trupa promatranog kao grednog nosača prevladavajuće opterećenje je moment savijanja M , a glavni je odziv savijanje grede, što se može izraziti putem zakrivljenosti grede χ , (Slika 28)

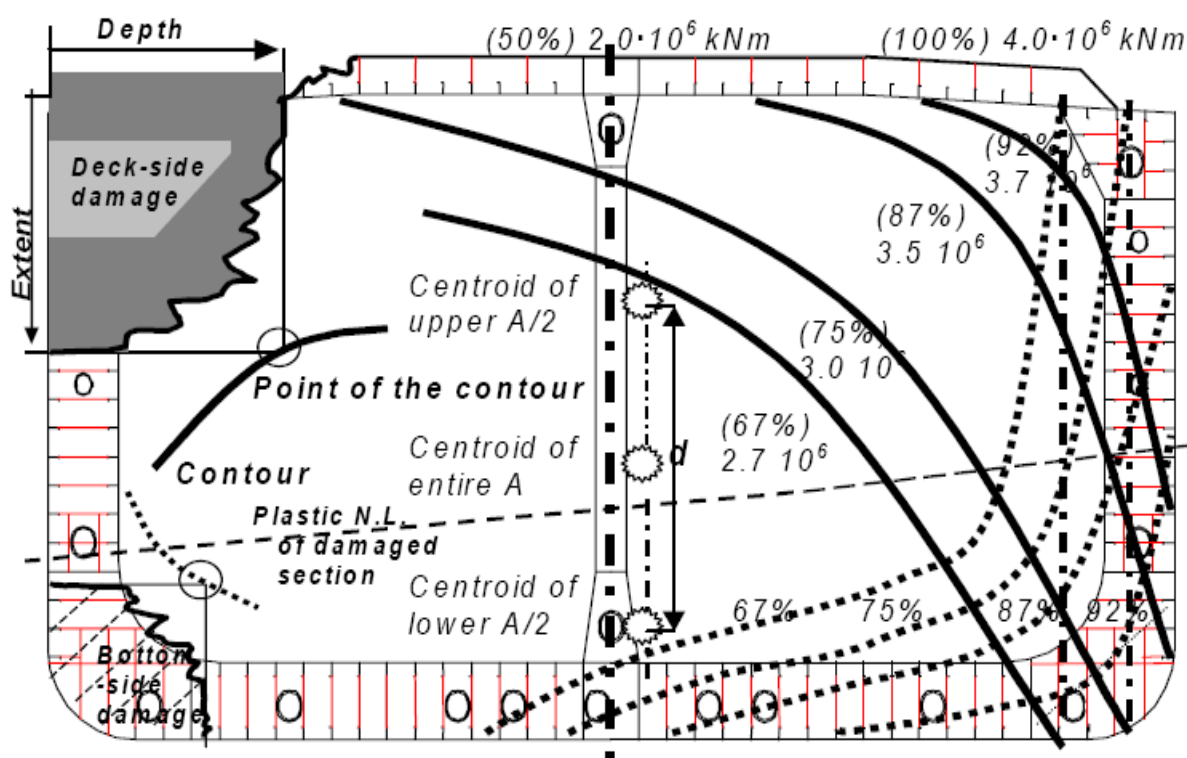


Slika 28. Ovisnost momenta savijanja M_{ULT} o zakrivljenosti trupa χ

Granični moment savijanja M_{ult} nastupa kad se dostatan broj elemenata unutar pojedinoga segmenta brodsakoga trupa slomi bilo zbog vlačnog ili tlačnog opterećenja što se očituje u maksimalnoj vrijednosti na krivulji momenta savijanja ovisno o zakrivljenosti trupa.

5.1. Koeficijenti smanjenja preostale čvrstoće prema podacima iz literature

- K. Žiha i M. Pedišić, [19]



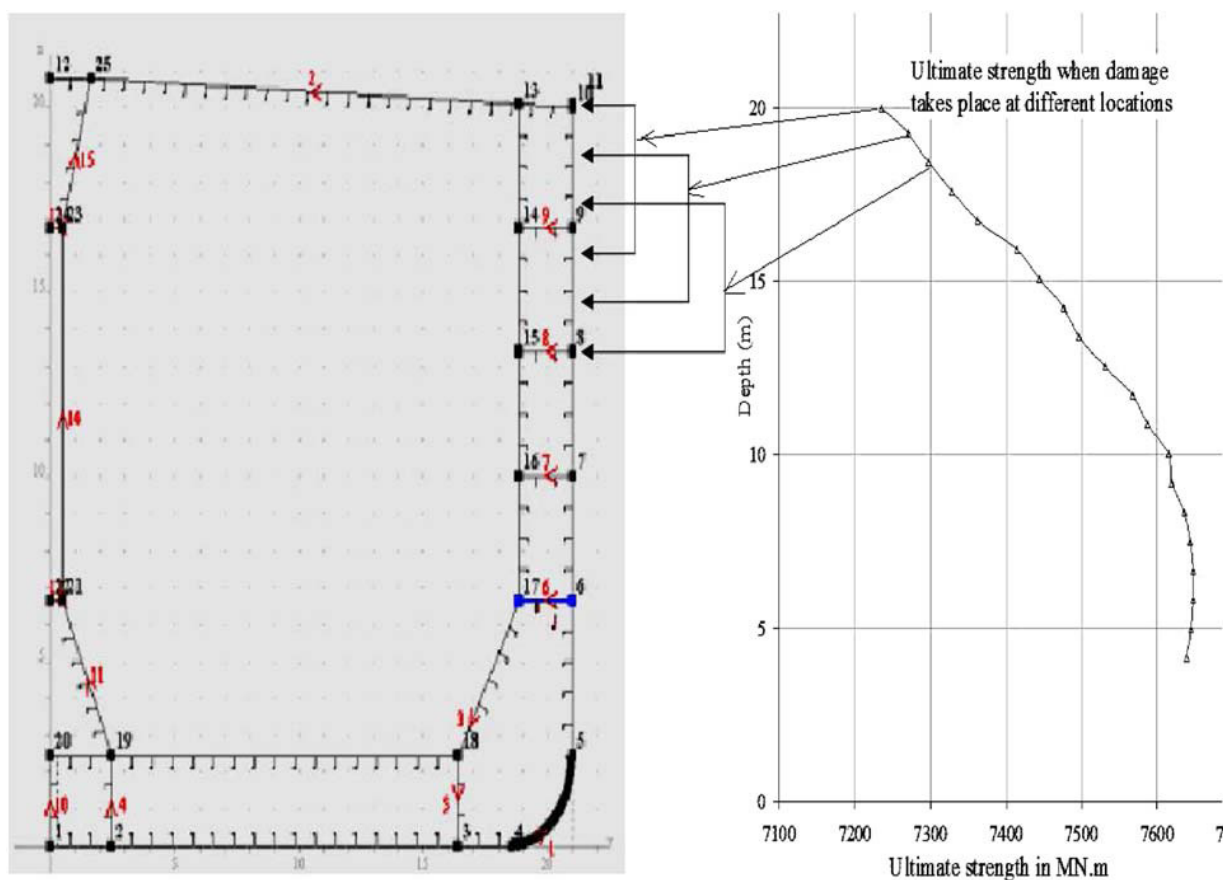
Slika 29. Konture vertikalnog plastičnog momenta otpora tankera za prijevoz naftnih preradevina

Na Slici 29 prikazane su krivulje vertikalnog momenta otpora u odnosu na pločaj i opseg oštećenja tupa tankera za prijevoz naftnih preradevina. Na desnu stranu se nanose oštećenje trupa prema odgovarajućem mjerilu (širina tankera iznosi 32,2 m) na određenu lokaciju i očita s krivulje postotak smanjenja preostale čvrstoće.

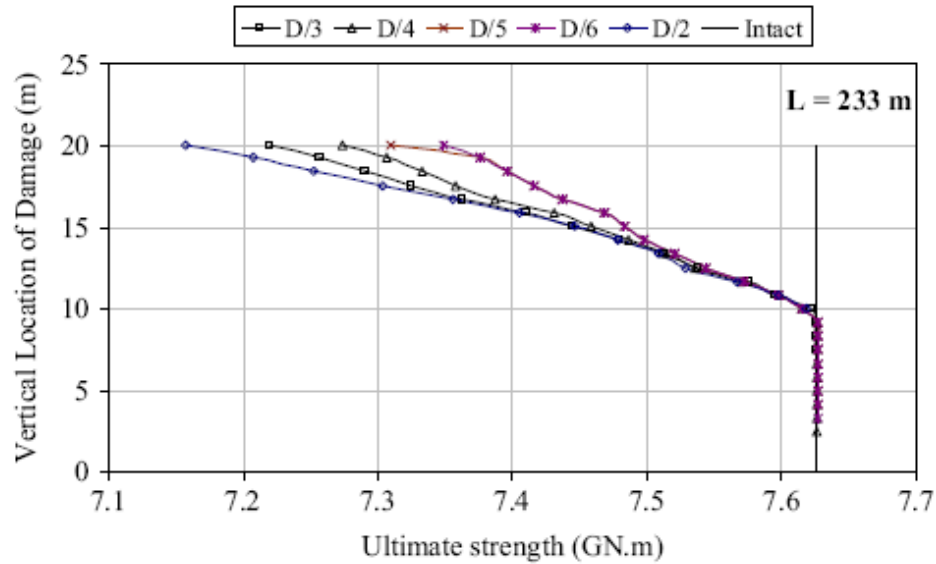
- A. W. Hussein i C. Guedes Soares, [5]

– SUDAR:

A.W. Hussein i C. Guedes Soares su proveli istraživanje granične čvrstoće za tri broda prema različitim mogućim scenarijima sudara. Veličine oštećenja se kreću od $D/6$ m do $D/2$ m (gdje je D visina broda). U prvom slučaju pretpostavlja se da je oštećenje u gornjem dijelu boka i proteže se $D/6$ m prema dnu. Lokaciju oštećenja su pomicali prema dnu te za svaki presjek izračunali granični moment savijanja. Iste proračune su ponavljali i s veličinama oštećenja od $D/5$, $D/4$, $D/3$ i $D/2$. Slika 30 prikazuje lokaciju oštećenja i odgovarajuću graničnu čvrstoću.



Slika 30. Različite lokacije oštećenja i odgovarajuća granična čvrstoća



Slika 31. Granična čvrstoća naspram lokaciji oštećenja

Slika 31 prikazuje graničnu čvrstoću za različite lokacije i veličine oštećenja pri sudaru. Očito je da je granična čvrstoća najmanja kada je oštećen dio trupa u području glavne palube. Naravno, kako je i za očekivati, što je veće oštećenje, to je manja granična čvrstoća.

Koeficijent preostale čvrstoće broda *RIF* (the residual strength index) predstavlja odnos granične čvrstoće oštećenog i neoštećenog broda.

Koeficijent *RIF* se definira kao:

$$RIF = \frac{M_{damage}}{M_{intact}}$$

Gdje je:

M_{damage} — granični moment savijanja oštećene sekcije

M_{intact} — granični moment savijanja neoštećene sekcije

Tablica 4. RIF za različite veličine oštećenja broda

Damage size	RIF		
	$L = 320 \text{ m}$	$L = 264 \text{ m}$	$L = 233 \text{ m}$
$D/6$	0.97	0.96	0.96
$D/5$	0.96	0.96	0.96
$D/3$	0.95	0.95	0.95
$D/4$	0.94	0.95	0.95
$D/2$	0.93	0.94	0.94

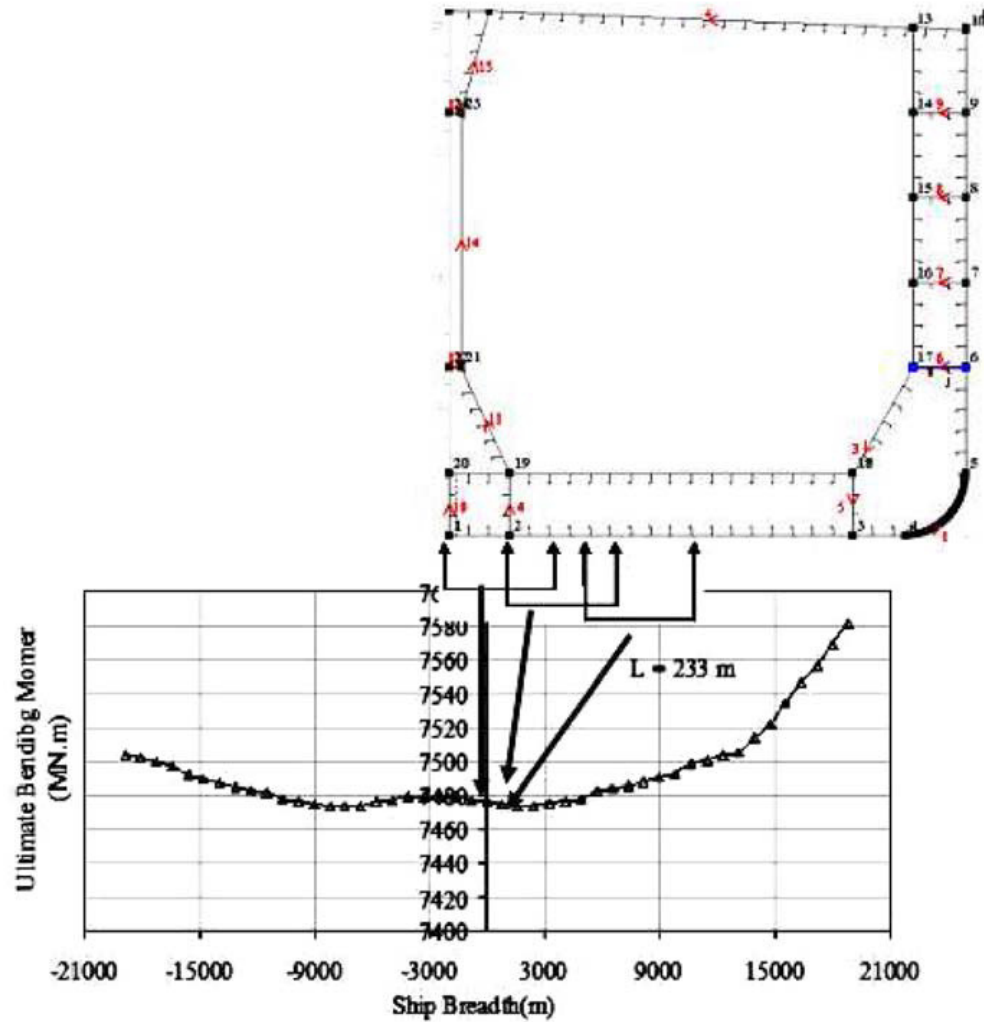
U *Tablici 4* su prikazani koeficijenti preostale čvrstoće (RIF) za tri broda kod različitih veličina oštećenja za sudar. Uzeti su najgori slučajevi koji daju minimalnu preostalu čvrstoću, tj. za oštećenja na gornjem dijelu boka broda. Iz tih podataka vidi se da brod može izgubit do 7% svoje čvrstoće nakon sudara.

Iz tih podataka izvedena je linearna jednadžba koja predstavlja odnos između RIF koeficijenata i veličine oštećenja kod sudara. Ta jednadžba dana je u sljedećem zapisu:

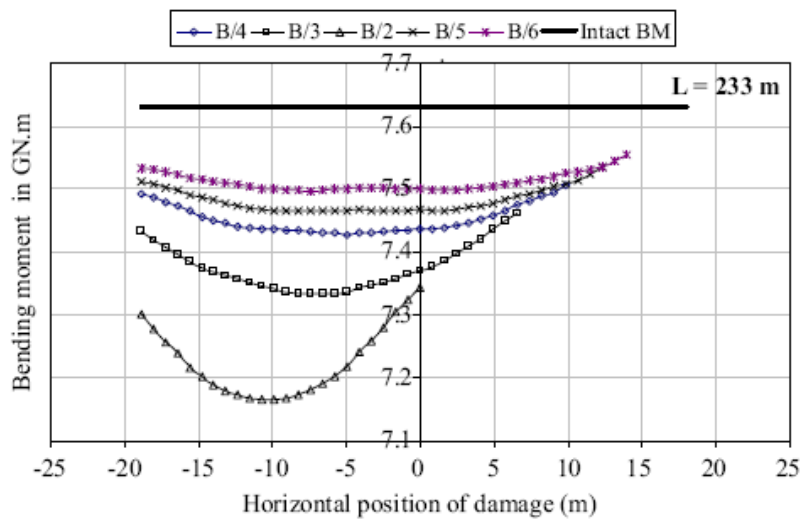
$$RIF = 0,98 - \left(0,084 \cdot \frac{\text{visina oštećenja}}{\text{visina broda}} \right)$$

– NASUKAVANJE:

Isti proračuni su izvršeni za nasukavanje broda. Lokacija oštećenja je pretpostavljena na različitim lokacijama dna u području glavnog rebra počevši od lijeve strane i nastavivši na desno. Veličina oštećenja varira od $B/6$ do $B/2$ (gdje je B šrina broda). *Slika 32* predstavlja utjecaj lokacije oštećenja na smanjenje granične čvrstoće kod nasukavanja.



Slika 32. Lokacija oštećenja i odgovarajući granični moment savijanja



Slika 33. Raspon oštećenja na dnu broda naspram graničnog momenta savijanja

U *Tablici 5* su prikazani koeficijenti preostale čvrstoće za tri broda kod različitih raspona oštećenja. Vidi se da brod može izgubit do 12% svoje čvrstoće poslje nasukavanja.

Tablica 5. Koeficijenti preostale čvrstoće

Damage size	RIF		
	$L = 320 \text{ m}$	$L = 264 \text{ m}$	$L = 233 \text{ m}$
B/6	0.978	0.991	0.984
B/5	0.959	0.974	0.962
B/4	0.948	0.966	0.951
B/3	0.925	0.948	0.928
B/2	0.884	0.917	0.885

Iz tih podataka izvedena je linearna jednadžba koja predstavlja odnos između RIF koeficijenata i veličine oštećenja kod nasukavanja. Ta jednadžba dana je u sljedećem zapisu:

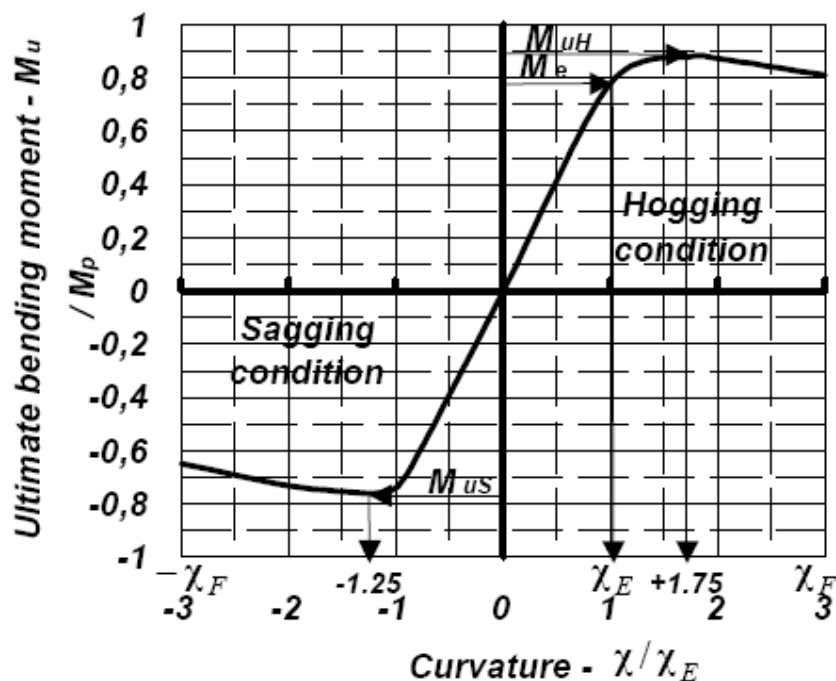
$$RIF = 1,02 - \left(0,254 \cdot \frac{\text{širina oštećenja}}{\text{poluširina broda}} \right)$$

5.1.1. Računalni program MARS

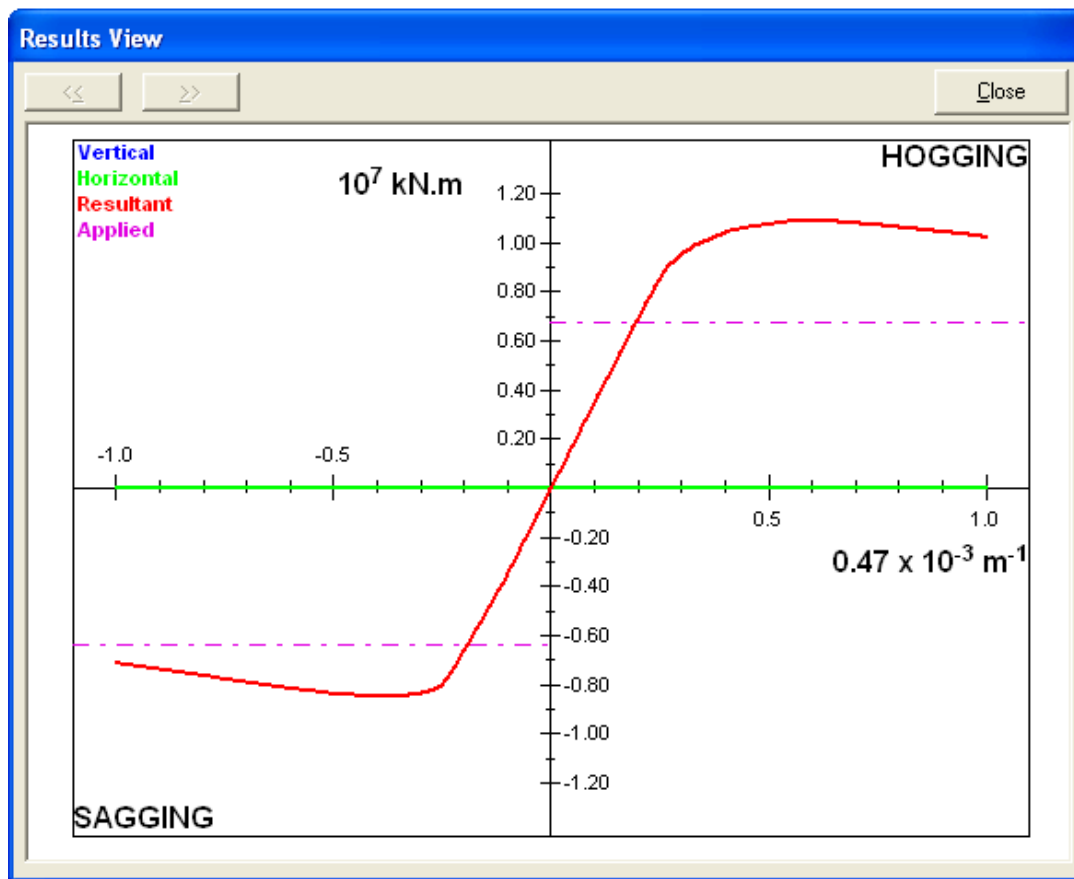
Programom MARS se provjerava poprečni presjek brodskog trupa prema pravilima klasifikacijskog društva Bureau Veritas i također usuglašenih pravila IACS-a. Bureau Veritas je u tom programu implementirao postupak na osnovi modela progresivnog sloma koji se zasniva na Smithovom postupku i Gordo-Soaresovim krivuljama srednjeg naprezanja i srednje deformacije za ploče i ukrepe.

Oštećenje je simulirano tako što smo uklonili oštećene elemente (prema pravilima iz ABS-a) i ponovno izračunali graničnu čvrstoću presjeka.

- Granični moment savijanja neoštećenog trupa

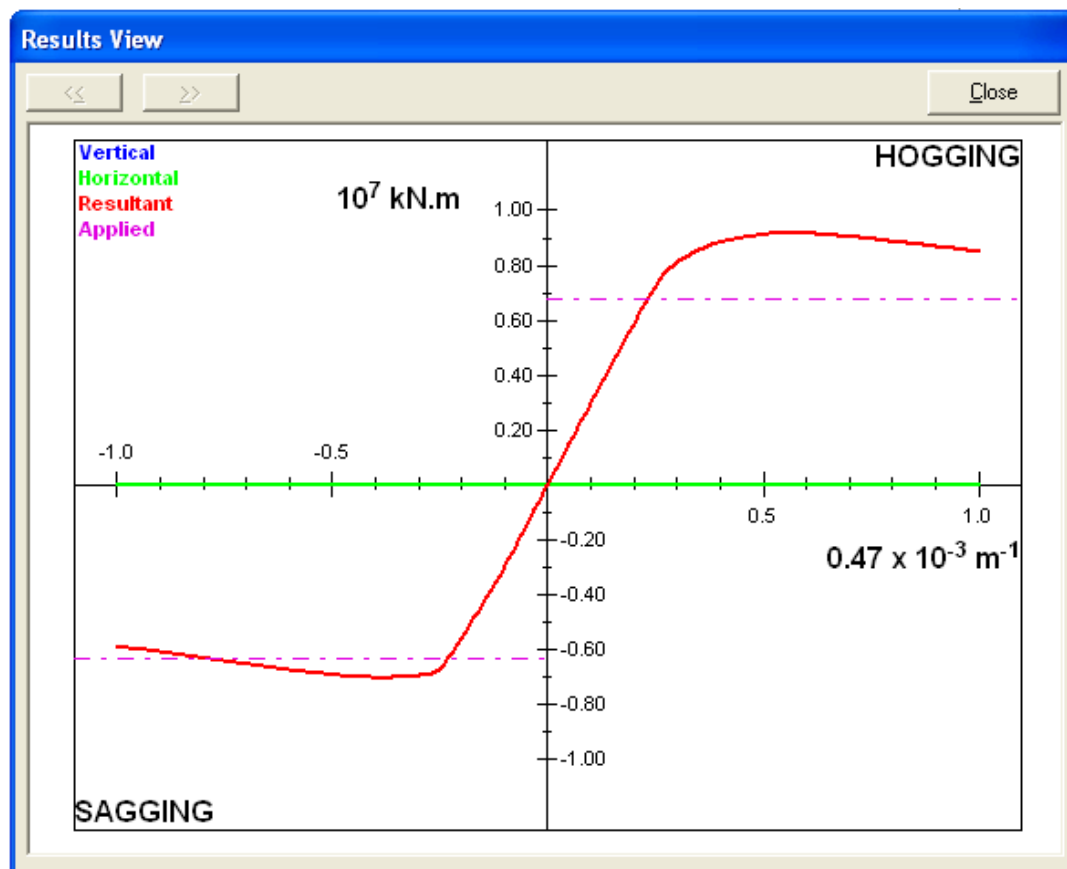


Slika 34. Krivulja maksimalnog momenta savijanja u ovisnosti o pregibu i progibu



Slika 35. Krivulja vertikalnog momenta savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti za brod bez korozije računalnim programom MARS

Na *Slici 35* prikazan je dijagram krivulje maksimalnog momenta u ovisnosti o pregibu i progibu dobiven računalnim programom MARS za brod bez korozije, a na *Slici 36* za korodirani brod. Postoci smanjenja preostale čvrstoće prikazani su u *Tablici 6*.



Slika 36. Krivulja vertikalnog momenta savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti za korodirani brod programom MARS

Tablica 6. Postoci smanjenja granične čvrstoće u odnosu na korodirani brod programom MARS

GRANIČNA ČVRSTOĆA [kNm]			
	bez korozije	sa korozijom	smanjenje [%]
Pregib	10893400	9657522	11.35
Progib	8470380	7370734	12.98

- **Granični moment savijanja oštećenog trupa**

U *Tablici 7* su prikazani iznosi granične čvrstoće za oštećeni brod kod sudara i nasukavanja i postoci smanjenja istih u odnosu na neoštećeni brod. Raspon oštećenja uzet je prema uputama ABSa.

Tablica 7. Granična čvrstoća za oštećeni brod kod sudara i nasukavanja

GRANIČNA ČVRSTOĆA ZA OŠTEĆENI TRUP [kNm]				
	Sudar	Smanjenje [%]	Nasukavanje	Smanjenje [%]
Pregib	10417220	4,37	10328380	5,19
Progib	7858624	7,22	8315968	1,82

5.2. Usporedba postotaka smanjenja granične čvrstoće

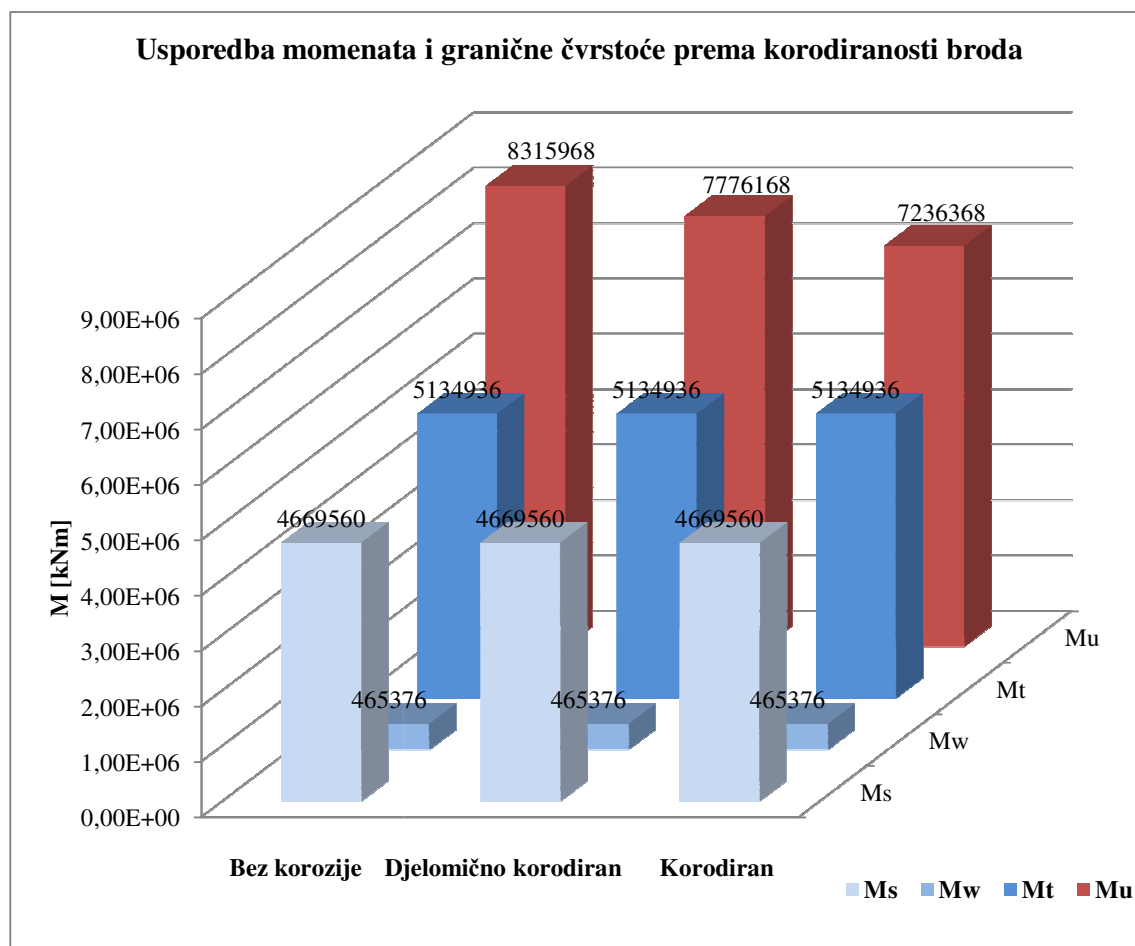
U *Tablici 8* su prikazani postoci smanjenja granične čvrstoće prema podacima iz različite literature u usporedbi s dobivenim podacima iz MARSa.

Tablica 8. Postoci smanjenja granične čvrstoće

Postoci smanjenja granične čvrstoće				
Autori:	god.		Sudar	Nasukavanje
Ge Wang i dr.	2000.	Pregib	-	5,23
		Progib	-	4,49
Ge Wang i dr.	2001.	Pregib	2,19	4,12
		Progib	3,51	3,72
K. Žiha i M. Pedišić	2002.	Pregib	10,00	10,00
		Progib	10,00	10,00
Rui M. Luis i dr.	2007.	Pregib	3,28	5,20
		Progib	6,15	1,80
A.W.Hussein i C.Souares	2009.	Pregib	-	6,47
		Progib	4,12	-
J.Parunov i Z.Burić	2011.	Pregib	4,37	5,19
		Progib	7,22	1,82

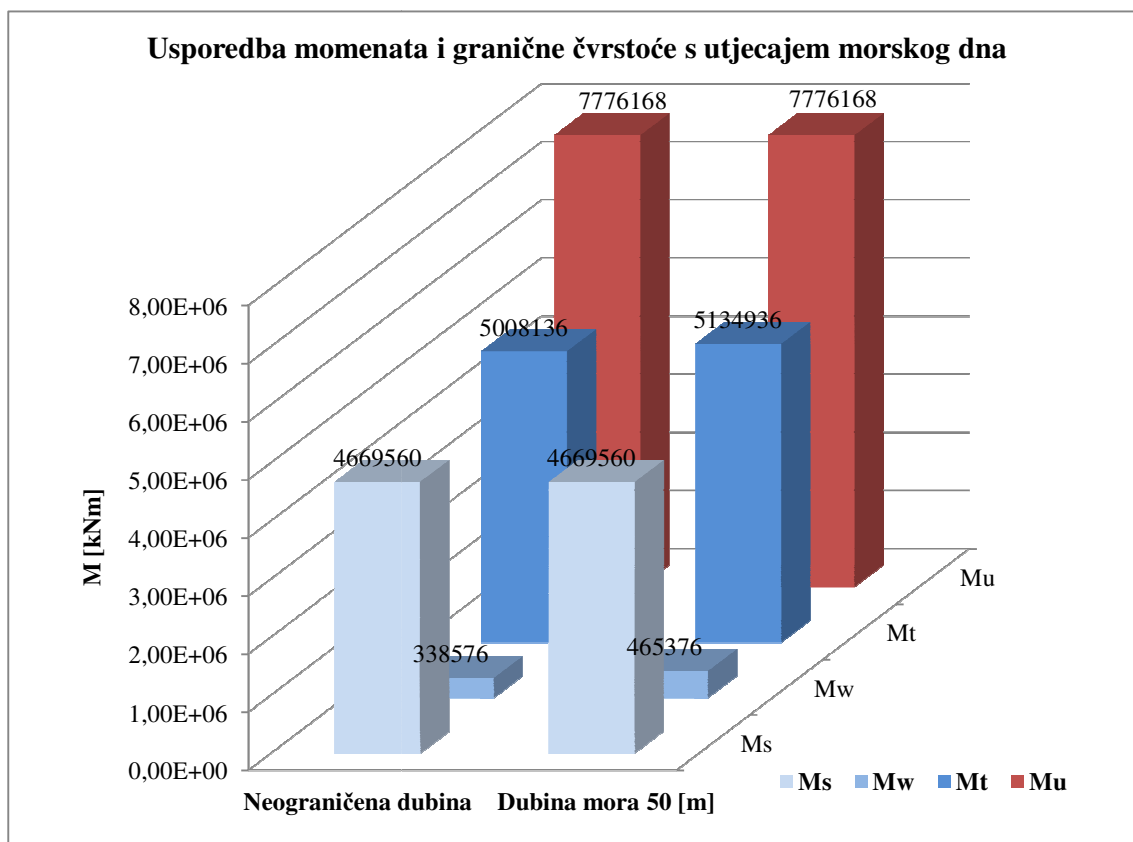
6. ODREĐIVANJE FAKTORA SIGURNOSTI

Na sljedećim histogramima uspoređeni su momenti savijanja na mirnoj vodi, momenti savijanja na valovima, te ukupni momenti opterećenja u odnosu na preostalu čvrstoću konstrukcije.



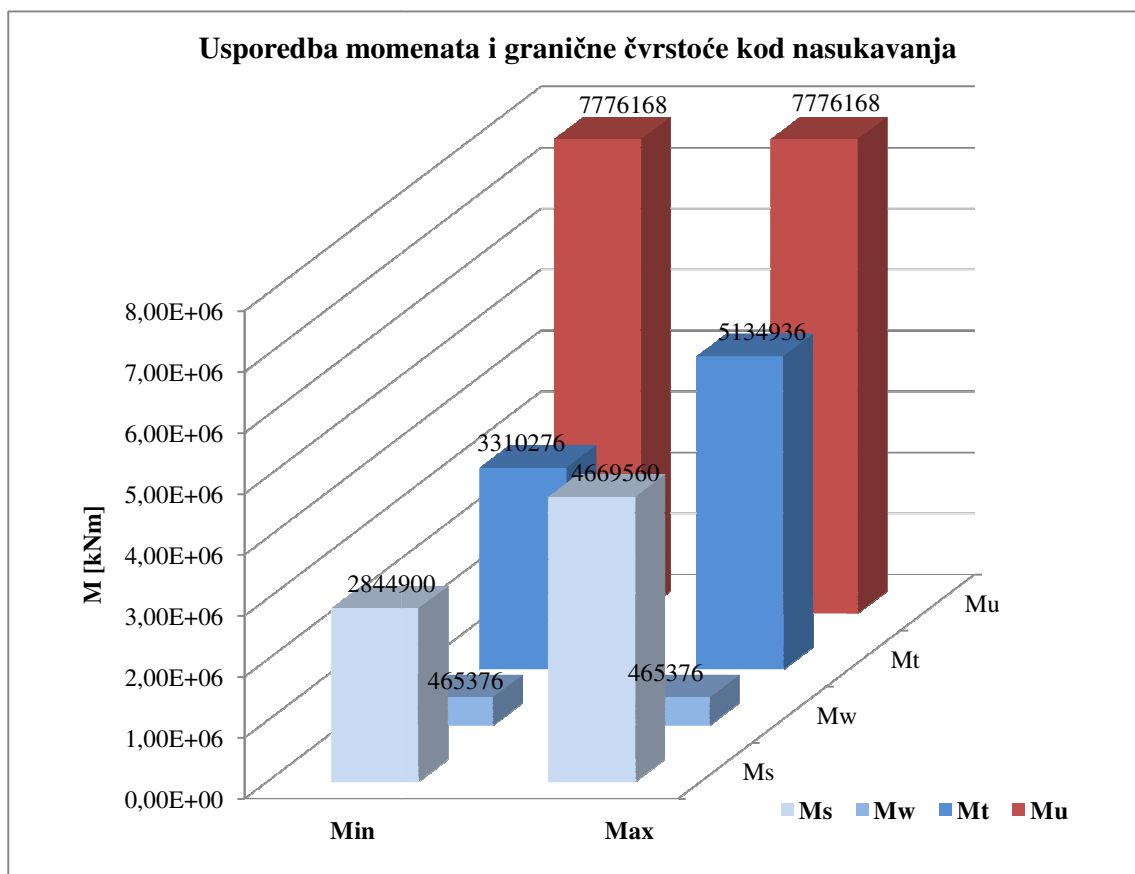
Slika 37. Histogram usporedbe momenata i granične čvrstoće prema korodiranosti broda

Na *Slici 37* su uspoređeni momenti s graničnom čvrstoćom prema korodiranosti broda. Uzet je najnepovoljniji slučaj za brod, tj. kada dođe do nasukavanja, a brod je u stanju progiba. Valni moment je za peroid tegljenja od 7 dana za Jadran i dubinu od 50 m. Vidimo da će i kod velike korodiranosti broda konstrukcija izdržati opterećenje i neće doći do loma trupa.



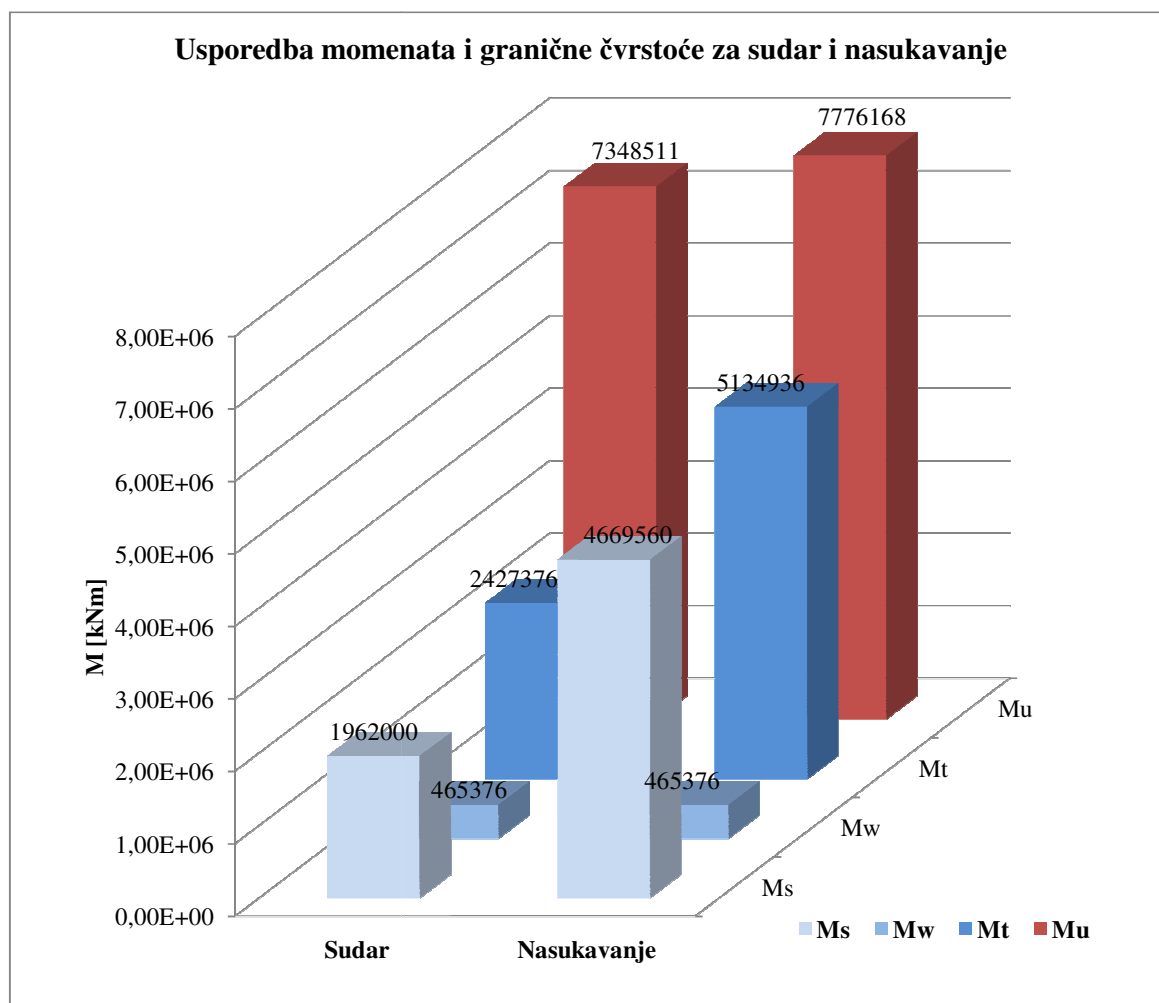
Slika 38. Histogram usporedbe momenata i granične čvrstoće s utjecajem morskog dna

Na *Slici 38* vidi se utjecaj dubine mora od 50 m na valni moment koji je za peroid tegljenja od 7 dana za Jadran, a brod je srednje korodiran i u stanju progiba kod nasukavanja. Iako je valni moment veći za dubinu od 50 m ukupna razlika momenata opterećenja s i bez utjecaja dna nije velika jer je valni moment znatno manji od momenta na mirnoj vodi pa ne daje veliki utjecaj na ukupni moment opterećenja.



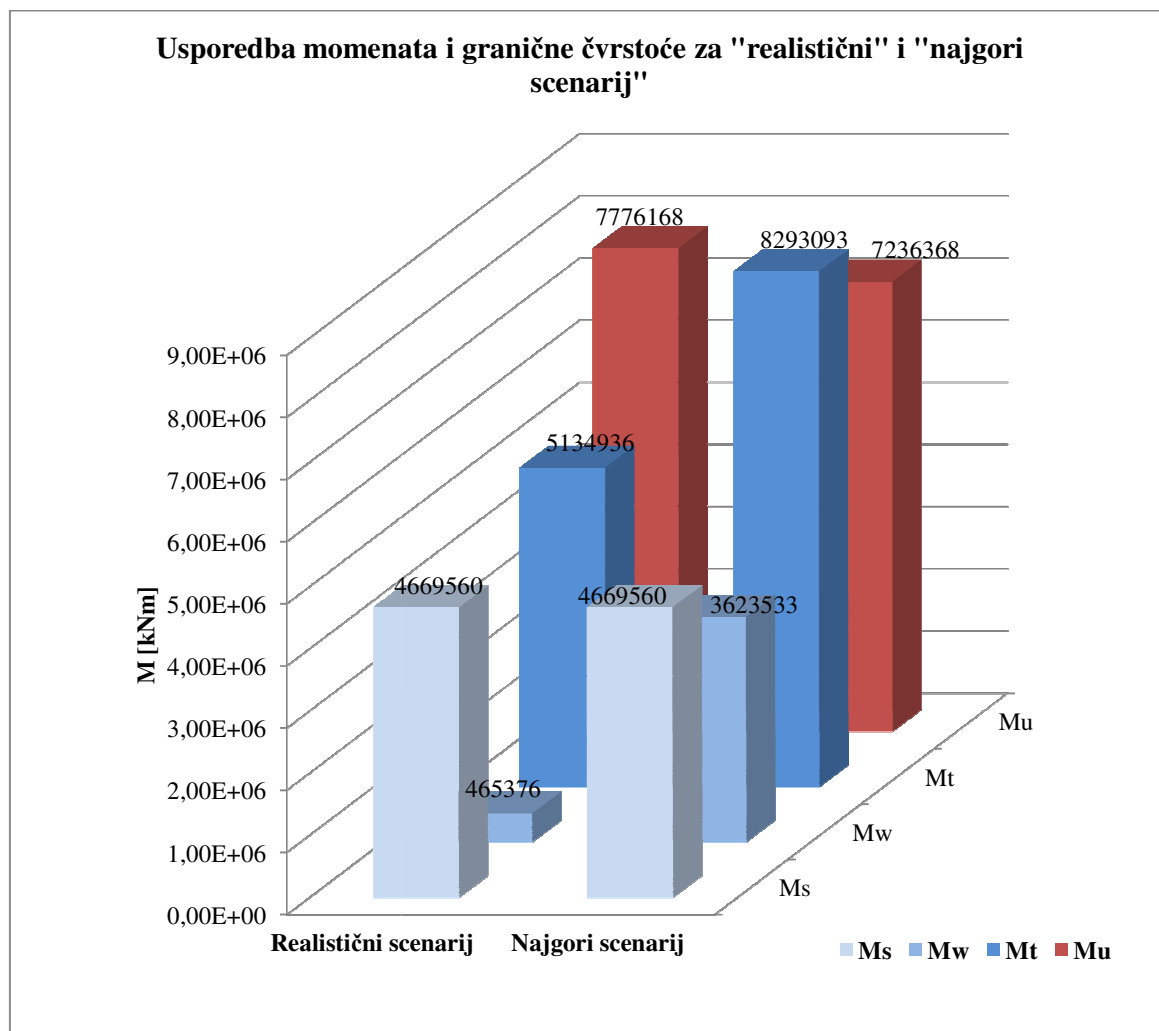
Slika 39. Histogram usporedbe momenata i granične čvrstoće kod nasukavanja za min. i max. oštećenje prema Slici 11

Slika 39 prikazuje usporedbu momenata i granične čvrstoće za minimalno i maksimalno oštećenja prema Slici 11. Osnovni utjecaj veličine oštećenja na Slici 39 je porast momenta savijanja na mirnoj vodi. Valni moment je za period tegljenja od 7 dana za Jadran i dubinu mora od 50 m, dok je brod srednje korodiran i u stanju progiba kod nasukavanja.



Slika 40. Histogram usporedbe momenata i granične čvrstoće za sudar i nasukavanje

Slika 40 prikazuje usporedbu momenata i granične čvrstoće za najgori slučaj kod sudara i nasukavanja, tj. za stanje progiba. Valja napomeniti da iako je kod sudara za stanje progiba manji moment na mirnoj vodi nego kod stanja pregiba preostala čvrstoća je manja kod progiba, stoga je ukupno stanje progiba lošije i za sudar. Valni moment je za period tegljenja od 7 dana za Jadran i dubinu od 50 m, dok je brod srednje korodiran. Vidi se da je nasukavanje daleko nepovoljniji slučaj oštećenja nego sudar.



Slika 41. Histogram usporedbe momenata i granične čvrstoće za „realistični“ i „najgori scenarij“

Slika 41 prikazuje „realistični scenarij“ za Jadransko more, valni moment je za period tegljenja od 7 dana za Jadran i dubinu od 50 m, brod je djelomično korodiran i oštećenje je za najnepovoljniji slučaj, tj. kada dođe do nasukavanja, a brod je u stanju progiba. Za „najgori“ mogući scenarij uzeto je da je brod korodiran do granica propisanih pravilima klasifikacijskih društava, oštećen nasukavanjem i u stanju progiba, a valni moment je uzet za značajnu valnu visinu od 7,5 m na dubini mora od 50 m, računavajući i koeficijent rizika premašivanja valnog momenta od 1%. Jedino u tom slučaju ukupni moment opterećenja premašuje granični moment i doći će do loma konstrukcije.

Faktor sigurnosti za opisani „realistični scenarij“ iznosi:

$$S_{\text{realistično}} = 1,51$$

7. DISKUSIJA

Najgori slučaj oštećenja je nasukavanje dok je brod u stanju progiba. Daleko manje posljedice na povećanje ukupnog momenta savijanja daje oštećenje sudarom.

Pod „realističnim scenarijem” je u radu uzeto da je brod srednje korodiran, valni moment za peroid tegljenja od 7 dana za Jadran na dubini od 50 m, a povećanje momenta na mirnoj vodi za progib kod oštećenog broda nasukavanjem je 238%, tj. uzet je naveći postotak za najgori slučaj oštećenja gdje su naplavljena 4 centralna tanka (*Slika 11*). Također su pretpostavljene projektne vrijednosti momenata savijanja na mirnoj vodi, a ne vrijednosti samo za potpuno nakrcan brod, što je još jedna pretpostavka na strani sigurnosti. Iz svega iznesenog slijedi da je postupak na strani sigurnosti čak i za tzv. „realistični scenarij” oštećenja.

Faktori sigurnosti za „realistični scenarij” oštećenja kod nasukavanja i sudara su prikazani u Tablici 9:

Tablica 9. Faktori sigurnosti kod sudara i nasukavanja za „realistični scenarij”

FAKTOR SIGURNOSTI (S)		
	Sudar	Nasukavanje
Pregib	3,16	2,88
Progib	3,03	1,51

Pod „najgorim scenarijem” je u radu uzeto da je brod korodiran do granica propisanih pravilima klasifikacijskih društava, valni moment za značajnu valnu visinu od 7,5 m na dubini mora od 50 m uračunavajući i koeficijent rizika premašivanja valnog momenta od 1%, a povećanje momenta na mirnoj vodi za progib kod oštećenog broda nasukavanjem je 238%. Također su pretpostavljene projektne vrijednosti momenata savijanja na mirnoj vodi. Tek u slučaju kada bi se sve te okolnosti poklopile, moglo bi doći do sloma trupa oštećenog broda.

8. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je bio analizirati ponašanje trupa oštećenog naftnog tankera u uvjetima Jadranskog mora. Tanker može biti oštećen sudarom s drugim brodom ili nasukavanjem, a uslijed čega bi došlo do povećanog opterećenja brodske konstrukcije zbog prodora mora te do istovremenog smanjenja njene čvrstoće. Tada bi i morski valovi mogli postati bitan uzrok preopterećenja konstrukcije. Kao nastavak takvog scenarija može se dogoditi lom trupa na dva dijela i potonuće broda kao najnepovoljniji ishod s vjerojatnim istjecanjem velike količine nafte u okoliš.

Analizom rezultata smo došli do zaključka da je vjerojatnost potpunog kolapsa oštećenog broskog trupa u Jadranskom moru veoma mala, tj. faktori sigurnosti su vrlo veliki. Za takav slučaj bi se trebalo poklopiti više otegotnih okolnosti: velika korodiranost broda (neodržavani brod star više od 20 godina), najnepovoljniji slučaj oštećenja, tj. najveći opseg oštećenja uzrokovanog nasukavanjem broda, te da se oštećeni brod nađe 3 sata u stanju mora opisanom značajnom valnom visinom od 7,5 m na dubini mora od 50 m. Jedino u tom slučaju ukupni moment opterećenja premašuje granični moment savijanja trupa i može doći do sloma konstrukcije trupa na dva dijela. Vjerojatnost pojavljivanja takvog stanja mora na Jadranu je izrazito mala jer se radi o najvećem ikad zabilježenom spektru valova u Jadranskom moru. Treba napomenuti da za vrijeme takvog uzburkanog mora kapetan dobije dojavu da izbjegava plovidbu u datom području što dodatno smanjuje ionako malu vjerojatnost susretanja takvog nevremena.

Na osnovi određenih opterećenja i čvrstoće oštećene konstrukcije određen je faktor sigurnosti nakon navedenih slučajeva oštećenja trupa za tzv. „realistični scenarij“. Minimalni faktor sigurnosti od 1.5 u skladu je sa sa kriterijima čvrstoće za put od mjesta nesreće do remontnog brodogradilišta ili tzv. „luke spasa“.

PRILOZI

I. CD-R disc

LITERATURA

- [1] American Bureau of Shipping, Guide for Assessing Hull-Girder Residual Strength for Tankers, July (1995.)
- [2] Bibliophile: Shipwrecks & sea disasters, (2010.)
<http://bibliophile-biblionet.blogspot.com/2010/07/shipwrecks-sea-disasters.html>
(stranica posjećena: 20. listopada 2011.)
- [3] Hussein A. W., Soares C. G., Reliability and residual strength of double hull tankers designed according to the new IACS common structural rules. // *Ocean Engineering* 36 (2009.); 1446–1459
- [4] Indymedia Australia, (2010.) <http://indymedia.org.au/2010/04/05/conservationists-criticise-government-over-coal-ship-grounding-on-great-barrier-reef>, (stranica posjećena: 20. listopada 2011.)
- [5] Jia H. i Moan T., Reliability Analysis of Oil Tankers with Collision Damage. // *OMAE, Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (2008.); 15-20
- [6] Luís R. M., Hussein A. W., Soares C. G., On the Effect of Damage to the Ultimate Longitudinal Strength of Double Hull Tankers. // *10th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures*, American Bureau of Shipping, (2007.)
- [7] Parunov J., Čorak M., Pensa M., Wave height statistics for seakeeping assessment of ships in the Adriatic Sea. // *Ocean engineering*. 38 (2011.); 1323-1330
- [8] Parunov J., Senjanović I., Wave loads on oil tankers in the Adriatic sea. // *Zbornik radova i Savjetovanje o morskoj tehnologiji, in memoriam Akademiku Zlatku Winkleru*, Rijeka, (2005.); 98-111
- [9] Prestige oil spill – Wikipedia, the free encyclopedia, (2011.)
http://en.wikipedia.org/wiki/Prestige_oil_spill, (stranica posjećena: 20. listopada 2011.)
- [10] Prpić-Oršić J., Čorić V., *Pomorštvenost plovniha objekata*, Zigo, Rijeka (2006.)

- [11] Rizzuto E., Teixeira Â., Soares C. G., Reliability Assessment of a Tanker in Grounding Conditions. // 11th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures (2010.); 1446-1458
- [12] Soares C. G., Basu R., Simonsen B. C., Egorov G. V., Hung C. F., Lindstrom P., Samuelides E., Vredeveldt A., Yoshikawa T., Damage assessment after accidental events. // 17th International Ship and Offshore Structures Congress (2009.); 1-72
- [13] Wang G., Chen Y., Zhang H. i Shin Y., Residual Strength of Damaged Ship Hull. // Ship structure Symposium, Research Department, American Bureau of Shipping, (2000.)
- [14] Wang G., Chen Y., Zhang H., Peng H., Longitudinal Strength of Ships With Accidental Damages. // Marine Structures. 15 (2002.); 119–138
- [15] Žiha K., Parunov J. i Tušek B., Granična čvrstoća brodskog trupa. // Brodogradnja. 58 (2007.); 29-41
- [16] Žiha K., Pedišić M., Sposobnost preživljavanja broda pri oštećenju trupa. // Brodogradnja. 48 (2000.); 48-56
- [17] Žiha K., Pedišić M., Tracing the Ultimate Longitudinal Strenght of a Damaged Ship Hull Girder. // International Shipbuilding Progress,49 (2002.); 161-176.